

LOISIRS
& CULTURE

Énergie,
MOBILITÉ,
NUMÉRIQUE

ENVIRONNEMENT, Habitat,
Santé et bien-être, SÉCURITÉ

Alimentation

► Correspond à
une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Charge utile, drones, robotique,
capteurs, intelligence artificielle,
raisonnement, driverless,
autonomie, aide à la décision,
internet des objets, données,
data, vision, perception,
apprentissage, réseaux, essaim...



Définition et périmètre

Initialement un des 34 plans pour la Nouvelle France Industrielle de 2013, la robotique est intégrée à l'Industrie du futur et est considérée comme une technologie à fort enjeu pour les objets intelligents, qui figurent parmi les 9 nouvelles Solutions Industrielles françaises¹.

On peut définir un robot comme un dispositif mécanique et électronique ayant la capacité de traiter de manière autonome de l'information pour effectuer une action appropriée. Le terme *d'autonomie* renvoie alors à une autonomie de décision, d'action, de mouvement ou énergétique.

L'autonomie constitue l'un des enjeux majeurs pour la robotique et correspond à une grande part des activités du domaine. Elle s'adresse à des engins terrestres, aériens, marins, sous-marins et évoluant dans des environnements naturels (intérieurs et extérieurs) ou en regard de situations variables (industrie). Elle concerne également les systèmes destinés aux environnements de la vie quotidienne. La France compte un grand nombre d'acteurs industriels qui sont des offreurs de technologies dans ce cadre et les domaines d'applications se déploient dans tous les champs de l'activité humaine.

La robotique autonome, qu'elle soit terrestre, aérienne ou navale, consiste en des systèmes ou sous-systèmes intelligents – intégrant des **moyens de perception, d'interaction** et des programmes applicatifs opérés dans un **système d'exploitation robotique** (*Robot Operating System*) – offrant une capacité **de modélisation, d'analyse, de planification, de prise de décision et d'action** dans la réalisation d'une tâche. Le principe même d'un système autonome est d'être en mesure de traiter une situation non prévue dans son plan initial, nécessitant une capacité d'adaptation à son environnement ou à la situation de travail.

Les systèmes robotiques, considérés jusqu'il y a peu comme des objets techniques à la disposition des ingénieurs, sont aujourd'hui pensés autour de leur usage. Le système robotique tend à devenir de plus en plus « apprenant » et nécessite de moins en moins d'être programmé, tirant partie des avancées sur la perception de l'environnement, sur le recueil et l'analyse des

données. Ces capacités d'apprentissage rendent possibles une représentation de l'environnement ou de la situation rencontrée à différents niveaux sémantiques par l'expérience acquise ou l'enseignement.

■ Alimentation

L'industrie agroalimentaire est un champ de développement pour la robotique. L'automatisation des procédés de transformation des aliments est un enjeu économique important pour les industriels du secteur, notamment pour des raisons de compétitivité en termes de prix. L'autonomie d'action du robot doit permettre alors d'appréhender des situations rendues variées par la diversité de forme ou de masse des matières premières manipulées. Notons que le déploiement de robots dans les chaînes peut se heurter à de véritables verrous techniques liés à l'hygiène ou à la conservation de la chaîne du froid.

■ Environnement

D'un petit robot mobile à un grand drone aérien, les applications pour l'environnement sont variées : robots indoor pour le monitoring et la purification de l'air intérieur (Diya One du français Partnering Robotics), ou à l'image de la startup montpelliéraine Cy-léone qui conçoit des systèmes aériens plus ou moins autonomes pour l'étude des sols, la cartographie et l'observation environnementale. À titre d'exemple, l'entreprise française Xamen a dévoilé en avril 2015 un drone de surveillance, certifié ATEX (atmosphère explosive), pour l'inspection de sites et d'installations industrielles, notamment les sites SEVESO. D'autres entreprises françaises, comme RedBird, Delair-Tech ou encore VisioDrones sont également à citer. Enfin, des applications autour de la prévention des risques environnementaux comme la surveillance d'un départ d'incendie et de son évolution dans une forêt sont également porteuses.

L'agriculture est un segment fortement réceptif aux nouveaux usages de robots autonomes, particulièrement en France où le secteur reste une source de croissance économique avérée. Aujourd'hui l'essentiel du marché est constitué par les robots de traite des vaches. Mais l'introduction des drones (aériens et terrestres) ouvre la voie à l'**agriculture de précision et durable** et à ses nombreux usages comme le diagnostic de la santé des récoltes et des besoins des parcelles agricoles, ou encore la détection de maturité d'une récolte. La clé de réussite des systèmes autonomes

¹ – Industrie du futur, réunir la Nouvelle France Industrielle, MINEFI, 18 Mai 2015.

dans l'agriculture est leur capacité à **aider à la décision** d'un exploitant dans la gestion raisonnée de ses cultures. Les robots d'entretien des cultures et d'assistance aux récoltes devraient également se développer de façon importante.

L'autonomisation de ces systèmes, aujourd'hui téléopérés, constituera une forte valeur ajoutée pour les utilisateurs et devrait fortement se développer dans les années à venir (cf. enjeux réglementaires « voir et éviter »).



■ Habitat

Ces robots répondent pour l'instant, en général, à des fonctions simples et très spécialisées. Les robots aspirateurs constituent aujourd'hui l'essentiel du marché. Cependant, LG a développé un robot aspirateur intégrant une caméra, permettant la reconnaissance des personnes et ouvrant la voie à des robots plus polyvalents.

Au-delà de ces fonctions simples, de nouveaux concepts arrivent sur le marché, portés par des acteurs comme Bluefrog Robotics ou Awabot : les robots sont ouverts à de nouvelles applications et sont entièrement programmables. Chez Bluefrog par exemple, le robot Buddy est piloté par un système d'exploitation ouvert, permettant d'en rendre les usages évolutifs selon un modèle de plateforme de services popularisé par les environnements iOS ou Android.

■ Santé et bien-être

Les premiers développements phares autour des robots autonomes, essentiellement au Japon, ont été les robots humanoïdes. À l'image de Nao, le robot humanoïde d'Aldebaran conçu en France, ces robots ont vocation à pouvoir communiquer avec les humains et à les accompagner au quotidien. Les usages évoluent et les robots commencent en 2015 à assister les personnes au quotidien, les aider dans leur déplacement (fauteuil roulant automatisé), les surveiller, les aider dans la posologie et la prise des traitements (table médicalisée autonome), etc. en prenant des formes semi-humoïdes ou non humanoïdes.

■ Sécurité

Ici sont principalement fléchées les applications de sécurité et de défense (Nexter Robotics, ECA, etc.). Beaucoup étant encore téléopérés, les drones sont de plus en plus utilisés pour des missions de surveillance militaire et d'exploration. Cependant, dès lors que la réglementation le permet, certaines parties des missions sont automatisées.

Des robots professionnels et civils font leur apparition sur plusieurs marchés, à l'image du français EOS Innovation qui conçoit des robots gardiens pour la surveillance de sites ou d'entrepôts. Enfin les robots peuvent également être déployés sur des sites sinistrés en cas de catastrophes pour des missions de sauvetage.

■ Mobilité

Le secteur de l'automobile s'ouvre à de nombreuses innovations technologiques grâce notamment aux systèmes avancés d'aide à la conduite (ou ADAS – Advanced Driver Assistance Systems) : aide au stationnement (Valeo), stationnement robotisé (Stanley Robotics), changement de voie automatique (Valeo), etc. Ces systèmes sont aujourd'hui de plus en plus de série sur les véhicules et sont, à l'aube du véhicule autonome, une première amorce de l'intelligence et de l'autonomisation. Outre les transports, le domaine de la logistique est également propice à l'innovation, grâce aux nouveaux usages des robots et drones. Des entreprises françaises comme BA Systèmes, Stanley Robotics ou Balyo sont en pointe dans ce domaine. Des entreprises comme Amazon et DHL sont des prescripteurs importants au niveau mondial et innovent dans les usages comme le montre le projet futuriste de livraison de colis par drones, ou l'inventaire et l'approvisionnement robotisés (Kiva Systems, Balyo, etc.).

■ Numérique

Un robot autonome est considéré comme une machine intelligente capable de percevoir et de communiquer avec son environnement. On peut alors envisager un réseau de robots ou de drones en équipe ou essaim, capables de se relayer des informations et de les diffuser. La dimension multi-robots est essentielle pour de nombreux domaines comme la logistique, la surveillance ou la prospection (exemple : CGG/Total).

La coopération entre des robots constitue un enjeu important pour couvrir les besoins liés à des opérations complexes nécessitant le déploiement de moyens

complémentaires en nombre important. La mise en œuvre de tels systèmes suppose un haut niveau d'autonomie de chacun des agents et au-delà l'utilisation d'environnements de programmation, de planification et de supervision des missions appropriés à la maîtrise de la complexité des missions à accomplir.

■ Loisirs & culture

Ce marché est notamment caractérisé par le succès des drones aériens grand public. Parrot est une entreprise française qui connaît un succès mondial en commercialisant des drones de loisir à destination du grand public. Il est possible de les contrôler via un *smartphone* ou une tablette et de voir ce que le drone perçoit à l'aide d'une caméra embarquée. Les applications autour de la prise de vue, photographique ou vidéo, à la fois dans le cadre domestique et professionnel (télévision, tournage vidéo/film, documentaires) à des fins commerciales sont aujourd'hui fortement répandues et matures.

■ Industrie

La robotique industrielle de manipulation tend également à être de plus en plus autonome, notamment pour la réalisation de tâches pénibles répétitives et de bas niveau. Elle nécessite l'intégration de capteurs et de la capacité de raisonnement pour l'adaptation à la variabilité des tâches.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La robotique autonome, au même titre que la cobotique, est au cœur du développement de l'Industrie

4.0, sujet majeur de l'évolution à court et moyen terme de l'industrie française en général et de l'industrie des transports et de la mécanique en particulier, et axe transversal de la politique de la Nouvelle France Industrielle. Elle est la clé de gains de compétitivité permettant éventuellement le renouveau de l'industrie et limitant les délocalisations.

L'introduction de la robotique autonome dans les produits et services est un facteur de développement commercial : robotisation de la conduite ou des déplacements, drones pour l'observation environnementale, robotisation des systèmes d'assistance (conjointement avec la cobotique) aux personnes, etc.

Doter les systèmes d'intelligence, de haute capacité de perception et d'interaction s'avère essentiel. Cette intelligence permettra, dans le cadre professionnel, d'assister et de remplacer l'homme dans des missions pénibles ou dangereuses pour, *in fine*, replacer l'homme au cœur d'une expertise métier, et de faciliter son quotidien dans le cadre domestique.

La France tient une position avancée dans la maîtrise technologique de ces compétences clés

- Une recherche nationale de très haut niveau ;
- Une position de leader technologique sur les drones civils.

Enfin, la robotique autonome doit également contribuer à relever un certain nombre de grands défis sociétaux : mobilité, aide aux personnes dépendantes, sécurité, protection de l'environnement...

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent la robotique autonome sont :

1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs

Les technologies influencées par la robotique autonome sont :

2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5ème génération
9	Fabrication additive
10	Cobotique et humain augmenté

Les technologies clés qui influencent la robotique autonome sont :

9	Fabrication additive
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
13	Communication Sécurisée
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
34	Authentification forte
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les technologies influencées par la robotique autonome sont :

11	Intelligence artificielle
13	Communication Sécurisée
14	Technologies immersives
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
35	Gestion intelligente de l'eau
36	Technologies de diagnostic rapide (eau, air et sol)
45	Technologies pour la propulsion
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les marchés

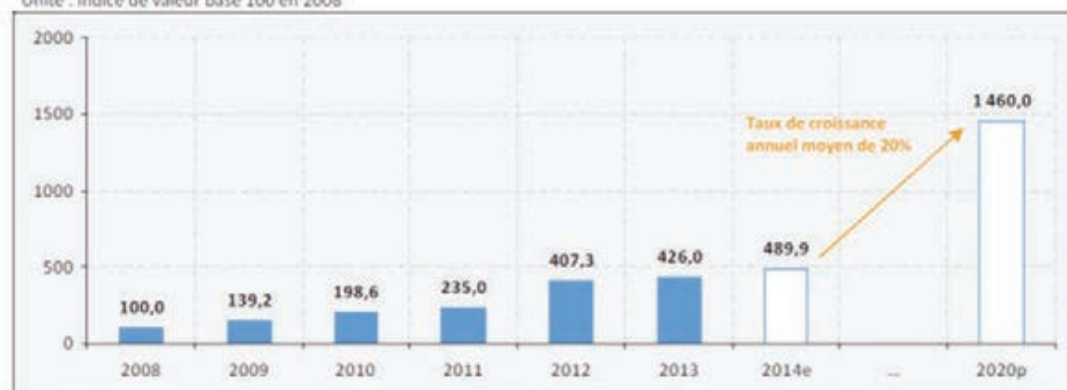
Le marché des robots autonomes est assez délicat à aborder du fait de sa forte segmentation et de son hétérogénéité. En effet, il faut savoir différencier le marché des robots et des technologies/compétences qui rendent ces robots/systèmes autonomes.

■ Robotique de service

De 2008 à 2014, le taux de croissance annuel moyen de la robotique de service a été de 29,4 % et pourrait tripler d'ici à 2020¹.

Le chiffre d'affaires des entreprises françaises spécialisées dans la robotique de service (*)

Unité : indice de valeur base 100 en 2008



(*) Y compris drones aériens et entreprises de distribution spécialisées dans la robotique, hors *technoproviders*
 Traitement, estimation et prévision Xerfi / Source : Xerfi d'après Greffes des Tribunaux de Commerce

Au niveau mondial, le parc de robots de services est estimé à 18 millions d'unités à horizon 2020 et atteindrait 20 Md\$³, soit un taux de croissance annuel moyen de 21 % à partir de 2014. Les projections à moyen terme sur les différents segments sont aujourd'hui peu

fiables, notamment quant aux échéances de développement des marchés. Les paragraphes qui suivent donnent cependant quelques éclairages.

■ Robotique de service professionnelle

Les ventes mondiales de robots professionnels se sont élevées à 21 000 unités en 2013 (+4 % par rapport à 2012) et représentent 3,6 Md\$. Les ventes se sont fortement dynamisées ces dernières années : 63 500 unités ont été vendues entre 1995 et 2007 et plus de

2 – Xerfi « La robotique en France », Mars 2015.

3 – Analyse Grand View Research « Global Service Robotics Market by Application », 2014.

100 000 entre 2008 et 2013. 45 % de ces ventes sont pour des applications militaires et de défense dont 8 500 drones volants téléopérés (-12 % par rapport à 2012), 700 robots/drones terrestres (+80 % par rapport à 2012). 300 autres robots ont été vendus pour la surveillance aérienne, robots démineurs et robots de sauvetage. La valeur globale des ventes mondiale des robots militaires est de 800 M\$.

Les **robots agricoles** quant à eux montrent un fort potentiel marché. 5 100 robots de traite ont été vendus en 2013 (+6 % par rapport à 2012) et 760 robots pour la gestion de parcelle et de bétail (+46 % par rapport à 2012). Ils représentent au total 28 % des ventes unitaires de robots de service et leur valeur totale s'élève à 883 M\$.

Les ventes de **robots médicaux** ont quant à elle chuté de 2 % et atteignent 1 300 unités dont 1 000 robots d'assistance au chirurgien. La valeur de vente a cependant augmenté et atteint en 1,45 Md\$ en 2013. Les 300 robots restants sont essentiellement des petites tables médicalisées mobiles et autonomes.

Enfin, les ventes de **robots logistiques** ont fortement augmenté de 37 % en 2013 et atteignent 1 900 unités, 1 300 unités pour la logistique industrielle et 450 à 600 unités pour la logistique (+32 %). Cette tendance se confirme et fait de la logistique un des marchés les plus porteurs à terme pour la robotique. Le BTP est un secteur dans lequel les applications émergent, avec des ventes recensées qui ont dépassé les 600 unités en 2013 ;

Le nettoyage, l'inspection et la sécurité sont ensuite les segments porteurs de la robotique de service.

■ Robotique de service personnelle

Près de 4 millions de robots personnels se sont vendus en 2013, en hausse de 28 % par rapport à 2012 et élève la valeur des ventes à 1,7 Mds \$. Les deux grandes familles d'usages prédominantes sont les **robots domestiques**, allant des robots ménagers : aspirateur, nettoyage, tondeuse à gazon, au **divertissement** et au **multimédia**. Le marché des robots domestiques **d'assistance à la personne** est en pleine effervescence avec une hausse de 345 % en 2013, soit 700 unités vendues.

■ Drones

En France, le marché des drones civils, qui représente près de 3 000 emplois, regroupe 1 300 PME et ETI,

dont 45 fabricants et plus de 1 200 opérateurs, et a généré en 2013 un chiffre d'affaires évalué entre 50 et 100 M€⁴ dont 90 % est constitué de prestations de prise de vue aérienne. Le marché mondial, selon le cabinet américain Teal Group, est évalué à 6,4 milliards d'euros, également fortement basé sur la prise de vue. Il devrait passer à 12 milliards de dollars d'ici à 2025.

Les défis technologiques à relever

Le concept d'autonomie de déplacement implique la capacité de déployer des systèmes robotiques dans des environnements naturels en s'appuyant sur des moyens de planification de missions fondés sur des connaissances a priori ou acquises. Ces moyens enchaînent dynamiquement, à partir d'un système de supervision, les commandes dites « orientées tâche » pour permettre l'adaptation du comportement aux variations de l'environnement en s'appuyant sur des informations extraites de capteurs.

Il faut pour cela disposer d'environnements logiciels pour la génération de plans et la supervision de leur exécution. Ces environnements autorisent notamment la planification de trajectoires optimales sur la base de divers critères et vis-à-vis des caractéristiques des systèmes.

Ces plans d'action peuvent ensuite être réalisés par des commandes orientées par les tâches, conditionnées par des contraintes intrinsèques au système, et par celles de l'environnement. Ces commandes présentent des formes génériques exploitant différentes techniques de commande comme la commande référencée capteur, voire multi-capteurs, sous des formes adaptatives et prédictives pour tenir compte des contraintes.

Ainsi, un système robotique intègre un ensemble de capteurs dont les données capturées sont traitées à bord par des calculateurs embarqués pour élaborer une représentation de son état, de l'environnement, ainsi que pour la mise en œuvre d'algorithmes de commande référencée capteur, ou pour évaluer l'avancement dans la tâche et déterminer les actions à réaliser pour progresser dans la mission.

4 – Colloque International « Présent et futur des drones civils », Novembre 2014 DGAC.

Les aspects d'autonomie décisionnelle sont d'une importance majeure pour le déploiement de ces systèmes dans des missions complexes. Les interactions naturelles avec ces systèmes et d'une manière générale la coopération de l'homme et de la machine sont également des dimensions essentielles, quoique moins prégnantes que pour celles de la cobotique. Certaines sources parlent – abusivement en 2015 – de « capacités de raisonnement » des robots. Ce verrou est en lien fort avec la technologie clé Intelligence artificielle. Le récent challenge DARPA est un exemple qui situe les limites actuelles dans l'autonomie des robots

L'actuation soulève également deux défis techniques que sont la préhension d'une part (capacité à manipuler des objets variés), l'autonomie énergétique d'autre part.

La question de l'interopérabilité constitue également un défi à mi-chemin de la technique, du normatif et du déploiement commercial. La question du système d'exploitation robotique, adapté au champ d'application, est clé pour le déploiement massif des dispositifs.

Enfin, la question générale de l'intégration des robots est centrale dans le développement de ces marchés. Alors que de nombreuses applications émergent et laissent place à l'automatisation, il faudra être capable de déployer ces systèmes dans différents types d'environnement tout en ayant la garantie du bon fonctionnement du système (sûreté et sécurité) : intégration dans un environnement froid (agroalimentaire par exemple), à fort rayonnement, etc.

En définitive, la clé de la réussite d'un point de vue technologique réside dans l'expertise et la maîtrise des **compétences métiers** du secteur d'application, et dans une parfaite interopérabilité du robot avec les éléments de son environnement (dont le système d'information). L'acquisition des données à l'aide de **capteurs (thermiques, caméras, optiques, etc.) actifs ou passifs** et leur modélisation/exploitation grâce à une combinaison **d'algorithmes apprenants et d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, Deep Learning)** conduira le robot à mener un panel d'**actions** qu'il aura lui-même décidé et à corriger son action en cas d'aléa. Les technologies embarquées à développer sont alors : algorithmes de planification, modélisation 3D de l'environnement, localisation par fusion des mesures de capteurs actifs ou passifs, détection, reconnaissance ou encore tracking de cibles.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le secteur est aujourd'hui en pleine expansion. Au cœur de ce dynamisme figurent les GAFA (Google, Apple, Facebook et Amazon). Ces quatre géants du high-tech (au sens large du terme) sont depuis les années 2010 très actifs dans l'acquisition de startups et PME spécialisées dans ou plusieurs compétences clés de la robotique. L'acquisition en 2012 de Kiva Systems – fabricant de robots logistiques totalement autonomes – par Amazon pour 775 M\$ ou encore Google qui, fin 2013, rachète en l'espace d'une semaine 8 sociétés de robotique (Boston Dynamics (Alphabet), Schaft Inc., Industrial Perception, Redwood Robotics, Meka Robotics, Holomni, Bot & Dolly, Autofuss et Deep Mind Technologies) en sont les exemples les plus significatifs.

L'arrivée de solutions intelligentes pousse à changer les habitudes et à revoir complètement, voire recréer, de nouveaux modèles économiques, ce qui s'avère être une tâche à la fois complexe et hétérogène suivant les secteurs et les technologies. Un défi commercial ou économique majeur aujourd'hui pour que l'industrie française tire vraiment parti de la robotique est de débloquer sa capacité à investir dans la robotique en sécurisant son investissement par un avis d'expert sur les retombées de la robotisation et un accompagnement dans la gestion sociale du changement.

Le secteur automobile s'appuie pour sa part sur l'intégration des ADAS dans les véhicules.

En revanche, les modèles économiques du secteur de la santé sont plus complexes à aborder de par les nombreux mécanismes et canaux de prises en charge d'une partie ou de la totalité d'un traitement ou d'un dispositif, particulièrement lorsque ces derniers ont un coût élevé. Cela génère des incertitudes sur les modèles économiques à mettre en place.

Les enjeux réglementaires

Le premier enjeu est juridique pour le déploiement de la robotique autonome. Il concerne la sécurité des personnes, ce qui conduit aujourd'hui des robots industriels haute cadence à opérer dans des cages de sécurité. Cette sécurité physique n'est plus possible dès lors que le robot évolue dans un environnement ouvert : c'est le cas pour des robots de logistique ou des véhicules autonomes. Se posent alors deux questions pour répondre à ces enjeux :

- Comment qualifier le niveau de sécurité, dans le cadre normatif, pour l'évolution de ces robots ? Des normes existent ou sont en cours d'élaboration : ISO 10-218 pour les robots industriels, ISO 13482 pour les robots d'assistance personnelle, IEC/NP 80601 pour les robots médicaux... ;
- Comment gérer les questions de responsabilité, d'un point de vue légal et assurantiel ?

Dans un autre cadre, la France a été pionnière dans la mise en place d'une réglementation avancée pour l'opération de drones civils. 4 scénarii d'usage ont été définis dans l'arrêté du 12 avril 2012, dont les évolutions

s'appuieront sur les remontées d'information des fabricants et opérateurs de drones à la DGAC.

Le « Sense and Avoid » (Voir et Éviter) quant à lui constitue également un enjeu réglementaire. À terme, la réglementation exigera de tous les systèmes robotiques aériens d'être dotés d'un système *Sense and Avoid* certifié pour pouvoir évoluer.

L'Europe, avec le groupe de travail du Parlement Européen sur la législation sur la robotique, et la France, avec le groupe de travail juridique du Comité Robotique (qui devra se coordonner avec les travaux européens), s'attaquent à ces questions pour faciliter le développement des marchés.

Analyse AFOM

ATOUTS

Recherche forte sur les compétences clés de la robotique, notamment dans le numérique
Dispositifs de soutien aux startups

FAIBLESSES

Acceptation de la société pour la robotisation de l'industrie
Faible tissu industriel en robotique de production, socle historique du développement du secteur
Marché national insuffisant pour porter le développement d'une offre commerciale

OPPORTUNITÉS

Réglementation favorise le développement de la filière, notamment pour les drones (existant)
Mouvement vers l'Industrie 4.0 et les besoins qui y sont liés, soutenu par le programme Industrie du futur de la Nouvelle France Industrielle

MENACES

Forces de la concurrence asiatique
Secteur en pleine révolution
Importance des investissements aux États-Unis sur la robotique

Facteurs clés de succès et recommandations

- Structuration et soutien de la filière

La robotique n'est pas une technologie en tant que telle. Il s'agit d'une combinaison de plusieurs technologies/compétences clés au secteur. En France, la filière est au meilleur niveau mondial au niveau de la recherche académique et dispose de PME technologiques très innovantes, mais souffre d'un retard en robotique industrielle face

à d'autres pays comme l'Allemagne, les États-Unis ou encore le Japon et la Chine, et **nécessite donc d'être soutenue au niveau national**. Les efforts de promotion de la robotisation de la production se heurtent encore au problème général de la faiblesse des investissements industriels, notamment dans les PME, et à une certaine réticence des organisations de salariés.

Néanmoins, le plan Robotique de la Nouvelle France Industrielle, inclus désormais dans l'Industrie du futur et la Solution Objets Intelligents, devrait permettre un développement important de la filière grâce notamment aux mesures de financement des entreprises (Fonds Robolution Capital, PIA ...), de soutien à la R&D (PIA, FUI, Eureka, ANR, Rapid...), d'aide à la robotisation (StartPME, prêts, mesures fiscales...), de développement et de stimulation de l'innovation par les concours, les plateformes et les challenges, etc.⁵

■ Formation

Il n'existe à ce jour que très peu de formations qui ouvrent la voie à un diplôme de robotique, bien que l'Onisep recense 38 formations en lien avec la robotique et ses disciplines : automatique, mécatronique, systèmes numériques et intelligents, intelligence artificielle, seulement 8 de ces formations sont fléchées robotique.

Inclure la (spécialité) robotique dans le cursus de formation initiale et de spécialité à

différents niveaux universitaires et dans les écoles de manière à intégrer les aspects transdisciplinaires du secteur permettra de renforcer la visibilité de notre formation et de notre expertise au niveau international. Cette tendance est déjà très largement amorcée, même si elle n'est pas toujours identifiée comme telle.

Il est également essentiel d'encourager le **développement de ressources pédagogiques en robotique pour la formation continue**, à l'image de l'Université Numérique Ingénierie et Technologique, qui a développé une thématique robotique dans ses approches pédagogiques et présentations.

La robotique pourrait également **être introduite encore plus en amont dans le cursus scolaire, par exemple au niveau collège** dans les cours de technologie sous forme de kit d'introduction. Au niveau lycée, des **plateformes mutualisées pour les travaux pratiques** existent déjà et leur développement devrait être fortement encouragé.

Acteurs clés

Entreprises	Akeo+, Aldebaran Robotics, Awabot, Be Spoon, Bluefrog Robotics, Cybernetix, E.ZICOM, EOS Innovation, Infotron, Medtech, Parrot, Partnering Robotics, Percipio Robotics, RedBird, Siléane, Stanley Robotics, Sunbirds, Xamen...
IRT, ITE, IHU	IRT Jules Verne, IRT Saint-Exupéry, SystemX...
Instituts Carnot	CEA LETI, CEA LIST, INRIA, IRSTEA, I@L, LAAS CNRS, M.I.N.E.S., ONERA, TSN...
Autres centres de recherches	BioMécanique et BioIngénierie (BMBI) – UTC, CRISTAL, CAOR/Mines ParisTech, IRCCyN, ISIR, Laboratoire HEUDIASYSC – UTC, LIRMM...
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, CapDigital, EMC2, Imaginove, IDforCAR, I-Trans, LUTB, Minalogic, Mov'eo, Novalog, Picom, Systematic, Véhicule du futur...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Aetos, CITC EuraRFID, Coboteam, FPDC, GdR Robotique, Robotics Place, SYMOP, SYROBO...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

5 – <http://proxy-pubminefi.diffusion.finances.gouv.fr/pub/document/18/17721.pdf#page=7>

LOISIRS & CULTURE

Énergie,
Mobilité,
NUMÉRIQUE

Environnement, **HABITAT**,
Santé et bien-être, **SÉCURITÉ**

Alimentation

► Correspond à
une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

communications radio privées,
Private Mobile Radio, PMR, LTE,
GSM, 3G, 4G, 5G, 3GPP, résilience,
régalien, réseaux dédiés, réseaux
virtuels, MVNO, cyberprotection



© Marine Nationale J. Pesche

Définition et périmètre

Les systèmes de « communications sécurisées » permettent la réalisation d'un échange de type voix ou données (selon les cas), garantissant un certain niveau de protection vis-à-vis des menaces prises en compte. Parmi ceux-ci, on trouve les solutions de radiocommunications sécurisées communément regroupées sous l'acronyme PMR (Professional Mobile Radio – on emploie parfois aussi Private Mobile Radio).

Nota : La sécurité des communications des systèmes embarqués, et la sécurité des objets connectés sont respectivement abordées dans les technologies clés « Systèmes embarqués et distribués sécurisés et sûrs » et « Internet des objets ».

Mis en œuvre pour répondre à des besoins professionnels, avec une grande diversité d'utilisateurs, les réseaux PMR correspondent historiquement à des réseaux indépendants fonctionnant sur des bandes de fréquences spécifiques, souvent distincts des réseaux de téléphonie mobiles classiques ouverts au public ; une tendance d'avenir est de mutualiser les infrastructures sans pour autant transiger sur les spécifications des PMR. Leur couverture est le plus souvent locale ou régionale ; les communications point à multipoint sont une de leurs caractéristiques clés (les réseaux de téléphonie mobile pour le grand public sont point à point).

Les réseaux de PMR comportent par ailleurs un certain nombre de spécificités qui les distinguent des réseaux de communication classiques : disponibilité, permanence du service, confidentialité renforcée, chiffrement, préemption d'appel, établissement de la connexion instantanée (Push to talk), appel de groupe, mode direct, etc.

On distingue deux grands types d'usages, pour lesquels la disponibilité du réseau et la confidentialité des échanges sont bien souvent des exigences critiques :

- les usages régaliens et gouvernementaux. Les communications sécurisées permettent aux services publics (police, gendarmerie, pompiers, sécurité civile, etc.) de maintenir un niveau élevé et durable de sécurité et de protection publique, notamment dans le cadre d'événements rassemblant de nombreuses personnes (rencontres sportives, commémorations, manifestations, etc.) ou lors d'opérations de secours (suite à des catastrophes naturelles ou industrielles, des accidents, des attentats, etc.) ;

- les usages professionnels. De nombreux secteurs d'activités sont concernés, tels que les transports (transports routiers, sociétés de bus, de taxis, services aéroportuaires, sociétés d'autoroutes, ambulanciers...), la sécurité et le gardiennage, le bâtiment et les travaux publics, l'énergie, l'industrie, les infrastructures.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

- Enjeu de souveraineté nationale

À date, les acteurs français maîtrisent la totalité de la chaîne de valeur des PMR, hormis quelques composants élémentaires (semi-conducteurs, capteurs, etc.), notamment grâce à Airbus Group, Thales ou encore Alcatel-Lucent ; il est important que cette maîtrise perdure et se renforce. La solution « Confiance Numérique » de la Nouvelle France Industrielle constitue également un cadre structurant qui permet aux acteurs français de conforter leur excellence et maîtrise technologique.

- Dimension économique importante

Avec un taux de croissance élevé (marché qui doublera en moins de 10 ans), maîtriser les solutions de communications sécurisées de demain permettra aux acteurs français de renforcer leur position face aux grands américains (Motorola) et acteurs asiatiques conquérants (comme Huawei).

Liens avec d'autres technologies clés

- Les technologies clés qui influencent les communications sécurisées sont :

6	Infrastructures de 5 ^{ème} génération
34	Authentification forte

- Les technologies influencées par les communications sécurisées sont :

3	Valorisation et intelligence des données massives
7	Systèmes embarqués distribués, sécurisés et sûrs

Les marchés

IMS Resarch évalue le marché mondial à 8 Md\$ et estime qu'il doublera à horizon 2023 pour atteindre 15 Md.

Le marché des PMR numériques est aujourd'hui dominé par 3 technologies : TETRAPOL, standard international d'origine française, conçu par Matra et dont Airbus est le fournisseur principal, TETRA, norme soutenue au niveau européen par l'ETSI et P25 (radio portable de combat) son équivalent américain utilisé par Motorola (et tous les acteurs majeurs proposant des solutions au trois standards).

En France le marché des PMR est composé d'environ 55 entreprises et représentait 1 800 emplois en 2014. Le marché est, et sera, fortement tiré par les usages régaliens au niveau national mais également par les grands industriels au travers de leurs activités au niveau national et à l'export. Il est également important de souligner qu'il s'agit d'un marché de renouvellement et de modernisation des infrastructures qui ont été déployées dans les années 1990.

Le secteur évolue vers un « réseau unique » (mutualisation des infrastructures) pour les applications privées et professionnelles, où les infrastructures LTE constitueront le cœur du réseau. Ce réseau unique comprendra toutes les architectures réseaux qui devront coexister et être disponibles selon les besoins : réseaux publics, privés, ad-hoc, bulles tactiques, etc.

Les défis technologiques à relever

Le marché, en renouvellement, laisse place à une forte mutation technologique : les PMR de demain ne seront plus uniquement sur des réseaux spécifiques mais partageront les réseaux LTE auxquels ils devront s'adapter. Dans une ère où les *smartphones* sont aujourd'hui démocratisés au sein du grand public mais également dans la sphère professionnelle et régaliennne, il y a un réel enjeu de sécurisation et d'adaptation des échanges privés et critiques sur les réseaux publics.

■ Développer les réseaux LTE

Les PMR de demain n'emprunteront plus uniquement des réseaux privés mais partageront les réseaux LTE (4G, puis 5G) publics très haut débit. Adapter les réseaux LTE aux PMR devient une nécessité pour répondre aux attentes des usagers des PMR : ils offrent un meilleur débit et permettront aux PMR de s'ouvrir dans de nombreux domaines, notamment industriels (en lien avec l'arrivée de l'internet des objets plus sécurisés).



■ Des réseaux LTE adaptées aux PMR sûrs, résilients et durcis

Outre le développement des infrastructures, il est essentiel d'aligner les caractéristiques des réseaux LTE et les normes et spécifications des PMR, notamment :

Services spécifiques : conversation groupée, messagerie instantanée (*Short Message Service, SMS*), transmission de données instantanées (*Short Data Service, SDS*), gestion des priorités (préemption, un *lead* qui est prioritaire dans une conversation groupée) et communications entre groupes de terminaux.

Systèmes résilients : même en mode dégradé, les systèmes continueront à fonctionner, notamment pour des opérations de maintien de l'ordre, de secours ou militaires.

Systèmes sécurisés : chiffrement, « surchiffrement », cryptographie et cyberprotection.

Développée par Thales en 2013, Nexium Wireless est une première solution vers les nouvelles solutions LTE adaptées aux PMR pour les applications liées à la sécurité civile ou militaire.

■ Améliorer l'ergonomie des PMR

Les PMR sont aujourd'hui basiques (petit écran, uniquement communication directe, pas d'autres fonctionnalités), une approche peut être de développer un terminal PMR de type Smartphone, qui utilise une bande passante LTE : l'ajout de fonctionnalités multimédia améliorera l'ergonomie et l'expérience utilisateur (mais en conservant la sécurité et la résilience). Nexium, de Thales, intègre TeSquad, un nouveau « *smartphone durci* » sous Android.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

■ Maintenir des prix compétitifs.

Bien qu'il soit pressenti à 15 Md\$ d'ici à 2023, le marché des PMR reste un segment d'ultraniche en comparaison avec le marché global des *smartphones* publics, estimé à 870 Md\$ (selon IDC).

Les commandes de PMR seront bien plus mesurées et le risque d'augmentation du prix unitaire d'un système est alors élevé. En adaptant les PMR aux réseaux LTE et au design de smartphones, il est essentiel que les prix restent comparables à ceux des smartphones, compte tenu de leurs spécificités augmentées.

Les enjeux réglementaires

■ Normalisation 3GPP : adapter les PMR aux usages publics et les bandes de fréquences LTE

Actuellement en cours de réflexion au niveau des instances européennes, il y a un fort enjeu de normalisation autour des standards techniques et des bandes de fréquences utilisables par les PMR pour les réseaux dits de services de protection publique et de secours en cas de catastrophe (*Public Protection on Disaster Relief*, PPDR). Cette normalisation doit se faire notamment au niveau de la coopération 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) entre organismes de standardisation des télécommunications mondiales.

Analyse AFOM

ATOUTS

Base installée forte dans le monde

Maîtrise de toute la chaîne (infra, terminaux, réseaux dédiés, S-MVNO)

Laboratoires académiques et enseignement supérieur

Présence dans les instances de normalisation

Comité de filière des industries de sécurité (CoFIS) mobilisé sur ces sujets

FAIBLESSES

Dispersion des grands acteurs

Investissement sur LTE 4G insuffisants

OPPORTUNITÉS

Marché national structuré

Le marché international va se renouveler

Opérateurs nationaux forts

Secteur des utilities exportateur qui peut porter l'offre

MENACES

Concurrence directe avec Motorola

Nouveaux entrants asiatiques très agressifs

Consolidation du secteur en cours

Besoins forts d'investir dans la LTE

Facteurs clés de succès et recommandations

■ Maintenir les efforts de R&D sur la thématique

Notre position de leader nous permet de répondre à de forts enjeux de souveraineté dans les télécommunications à l'exemple des projets de démonstrateurs lancés dans le cadre du plan « Souveraineté Télécoms » : travaux de recherche sur la 5G (consortium projets européens 5GPP), démonstrateur d'un réseau 4G permettant d'offrir un réseau haut-débit et sécurisé, dédiés aux services de secours et aux opérateurs d'importance vitales (respectivement Airbus Group et Thales) labellisé par le CoFIS.

■ Dynamisme dans les groupes de normalisation

Il est essentiel que les acteurs français participent aux groupes de normalisation et d'évolution des réglementations, particulièrement en ce qui concerne l'allocation de bandes de fréquences publiques. Un groupe de réflexion piloté par l'ANSSI et dans le cadre du plan « Souveraineté Télécoms » a été lancé mi-2014, qui consiste

à émettre des recommandations concernant l'évolution de la réglementation sur la sécurité des réseaux.

■ Favoriser le rôle des startups innovantes pour redynamiser l'écosystème français

Il est important de permettre aux startups et PME, qui ont des moyens de R&D limités malgré un fort savoir technique, d'avoir accès à tous les outils, plateformes, accompagnement nécessaires à leur développement technologique et commercial en France et à leur expansion à l'international. L'exploitation par ces entreprises des moyens de R&D externalisés et collaboratifs serait un levier considérable vers la souveraineté de la France dans les communications numériques et sécurisées : projet européens collaboratifs, SATT, subventions, etc.

À ce titre, une action du plan « Souveraineté Télécoms » pilotée par EBLink est de redynamiser le développement économique des startups et PME en renforçant leur participation afin de recréer un écosystème en France.

Acteurs clés

Entreprises	Airbus Defence and space - Centre d'Excellence Electronique, Airlynx, Alcatel-Lucent, Eolane, Etelm, Expway, Hub One, Ibelem, Logic Instrument, Luceor, Orange, Prescom, Sequans Communication, Sentryo, Sigfox, Sysoco, Thales Communications & Security, Wiko...
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX...
Instituts Carnot	INRIA, M.I.N.E.S., TSN...
Autres centres de recherches	ESIEE, Mines Telecoms...
Pôles de compétitivité	CapDigital, Images et Réseaux, SCS, Systematic, TES...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Lora...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

LOISIRS
& CULTURE

Énergie,
MOBILITÉ,
NUMÉRIQUE

Environnement, HABITAT,
Santé et bien-être, Sécurité

Alimentation

► Correspond à
une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

RV, RA, réalité mixte, haptique,
son 3D immersif, perceptual
computing, Interfaces
Homme-Machine, analyse
comportementale, 3D, 360,
Brain Computer Interface,
interopérabilité.



Définition et périmètre

Les technologies immersives consistent à plonger l'utilisateur dans un environnement avec lequel il est capable d'interagir en utilisant ses capacités sensorielles et somatosensorielles. Ces technologies regroupent la réalité augmentée (RA), la réalité virtuelle (RV), la réalité mixte, le son 3D immersif ainsi que les technologies d'interfaces homme-machine (IHM). Ces technologies sont particulièrement diffusantes et peuvent servir des objectifs très variés allant du jeu à la formation en passant par l'aide à la conception de prototypes ou encore l'assistance/le guidage via l'apport d'informations.

La RA consiste à superposer des informations virtuelles, en 2D ou en 3D, en temps réel à notre perception du réel afin de créer une « nouvelle réalité ». Si la RA peut relever de l'ouïe et du toucher (interfaces haptiques) la plupart des interfaces développées sont visuelles. Les terminaux utilisés sont : les *smartphones*, les tablettes, les projecteurs, les lunettes, et plus rarement d'autres dispositifs comme les télescopes.

La RV permet d'immerger totalement l'utilisateur dans un univers virtuel, interactif, simulé et calculé en temps réel. La RV est réalisée à l'aide d'images de synthèse d'un environnement virtuel en 3D diffusées par le biais de lunettes, de casques de RV, de caves virtuelles ou visiocubes - *cave automatic virtual environment* (CAVE) - ou de grands écrans cylindriques.

Moins connue que la RA et la RV, la réalité mixte consiste en une hybridation entre le réel et le virtuel, qui passe par l'intégration dans le monde réel d'objets virtuels persistants avec lesquels l'utilisateur peut interagir. Cette technologie est par exemple utilisée par le système holographique du casque HoloLens de Microsoft.

L'interaction est un enjeu central pour les technologies immersives, elle est rendue possible par l'utilisation d'IHM. Les IHM sont des outils qui permettent à l'utilisateur de contrôler, visualiser et communiquer avec un système. Les IHM des technologies immersives peuvent par exemple comprendre des capteurs de localisation (inclinomètre, gyroscope, accéléromètre, etc.), des capteurs de mouvement (marqueurs passifs réfléchissants utilisés avec une caméra infrarouge, caméra RGBD, gant de données, dispositif de capture de l'activité musculaire, etc.) et des interfaces dites haptiques (simulation du retour d'effort). La question de l'ergonomie est intimement liée à celle des IHM.

Le son 3D immersif vise à apporter une nouvelle expérience utilisateur et propose plusieurs approches. « L'écoute binaurale » est une technologie de son immersive qui permet à l'auditeur de localiser chaque élément sonore dans l'espace à trois dimensions uniquement grâce à une paire d'oreillettes, un casque audio ou des hauts-parleurs. Cette technique de restitution s'appuie sur la différence de perception du son par les deux oreilles liée à des phénomènes de décalage temporel entre des variations d'intensité et des variations spectrales et renforce l'immersion du spectateur dans la scène virtuelle. Par ailleurs les nouveaux formats Dolby Atmos, Auro 3D et DTS:X, permettent de proposer une représentation de contenus audio spatialisés. Ces nouveaux formats intègrent des outils de mixage spécifiques afin de proposer une composition sonore de ces contenus rendant possible un rendu de qualité via divers systèmes de restitution multicanaux (5.1, 7.1, 22.2,...), afin de renforcer le réalisme et donner l'impression au spectateur d'être au plus près du film.

■ Habitat et urbanisme

Les technologies immersives ont notamment donné naissance à des applications commerciales dans le secteur de l'habitat et de l'immobilier comme la simulation de décoration d'intérieur ou les visites virtuelles de logements et de bâtiments. Elles sont également mobilisées dans le cadre de projets d'urbanisme. La ville de Lyon a ainsi développé une application de RA permettant aux habitants de visualiser le réaménagement du quartier de la Confluence.

La RA est de plus en plus utilisée dans la conception, la maintenance et la gestion technique des bâtiments.

Le maquettage numérique de bâtiment – *building information modeling* (BIM) – est en plein développement. Combiné aux technologies de RA et de RV, il permet une meilleure modélisation, vision et compréhension d'un ouvrage à réaliser. Le français Bouygues Construction utilise depuis plusieurs années le BIM et les technologies immersives dans ses projets non seulement pour la conception mais aussi pour l'exploitation et la maintenance. Ces outils permettent en effet de prévoir et d'optimiser les opérations tout en centralisant l'historique des travaux effectués.

■ Santé et bien-être

Les technologies immersives sont étroitement liées aux technologies « Cobotique et Humain Augmenté » et

trouvent de nombreuses applications dans le secteur médical aussi bien du côté des patients que des professionnels. Les lunettes de RA permettent par exemple d'assister les personnes malvoyantes en projetant les informations sur les zones de l'œil les moins détériorées ou encore en modifiant les contrastes. La RA est également un vecteur d'assistance au chirurgien. En phase préopératoire elle sert d'appui au diagnostic et à la planification opératoire grâce à la modélisation en 3D du patient. En phase peropératoire elle guide les gestes du chirurgien grâce à l'affichage d'informations directement sur la zone traitée. La RV est quant à elle surtout mobilisée pour la formation aux gestes chirurgicaux.

■ Énergie

La RA est de plus en plus mobilisée pour l'assistance opérationnelle, la maintenance et la formation des opérateurs. Étroitement liée aux technologies clés « Technologies pour l'énergie nucléaire » et « Modélisation, simulation et ingénierie numérique », l'utilisation des technologies immersives pour les interventions sur sites critiques se développe. Le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) a par exemple mis en place en collaboration avec Oreka Solutions une salle immersive dans le but de préparer les chantiers de démantèlement nucléaire et de simuler des opérations en sensibilisant les opérateurs aux différents risques.

■ Mobilité

Les applications de navigation utilisant la RA se multiplient et laissent à penser que cette technologie sera intimement liée au développement des GPS dans le futur. Les MINI Augmented Vision, prototype de lunettes de RA développé par BMW, illustrent bien cette tendance. Ces lunettes affichent les informations de conduite (vitesse, direction à suivre, limitations, niveau de carburant, etc.) dans le champ de vision du conducteur. Elles exploitent également des caméras placées sur la voiture afin d'afficher ce qui se trouve dans les angles morts.

■ Industrie-Usine du futur

On voit apparaître de plus en plus d'applications mobilisant les technologies immersives dédiées à la conception, la modélisation, le prototypage, la simulation des conditions de production, l'assistance, ou encore la maintenance en milieu industriel. Les industries automobile, aéronautique et spatiale sont des précurseurs dans l'utilisation de ces technologies.

PSA Peugeot Citroën a créé un centre de réalité virtuelle à Vélizy-Villacoublay comprenant notamment un visiocube (CAVE), un écran stéréoscopique et une table de réalité virtuelle (workbench) pour optimiser la visualisation de ses modèles. Le groupe Renault a également équipé son centre de Guyancourt d'un visiocube.



Le groupe Dassault Aviation intègre à ses chaînes d'assemblage une solution de RA projective développée par la société Diotasoft permettant de guider les gestes des opérateurs. Les sociétés Airbus et Accenture vont également implémenter des lunettes de RA sur la chaîne d'assemblage de l'Airbus A330 à Toulouse.

■ Communication Numérique

La RA est de plus en plus utilisée dans le domaine du e-commerce et de la publicité. Concernant le e-commerce, elle permet par exemple au consommateur de visualiser en 3D un produit dans son environnement de destination ou encore d'essayer virtuellement un produit comme l'a proposé Atol pour certaines de ses collections de lunettes. La publicité s'empare de la RA pour attirer l'attention des consommateurs comme le montre la campagne Pepsi Max, réalisée en 2013 pour les abribus londoniens. La RA permet également d'enrichir le *print* à l'aide d'animations. Cette technologie a par exemple été utilisée par Volkswagen lors de sa campagne publicitaire pour la New Beetle 2012.

■ Formation

Les technologies immersives deviennent progressivement des outils de formation dans les milieux scolaires et professionnels. La RV permet notamment de visualiser des systèmes complexes ou encore de se former par des mises en situation sous forme de *serious games*. La plate-forme Virtualiteach développée dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir vise ainsi à intégrer la RA et la RV dans les enseignements

de la filière technologique et professionnelle. Les applications proposées sont très variées : simulation d'une opération sur un chantier, expérience des forces de frottement grâce à un bras avec retour d'effort, étude de l'acoustique d'une salle, etc.

■ Loisirs & Culture

Les jeux vidéo constituent un champ d'application privilégié pour les technologies immersives et plus particulièrement pour les casques de RV. Couplés à un casque audio permettant de diffuser un son 3D binaural, ces derniers promettent d'immerger totalement l'utilisateur dans l'univers de jeu. De nombreux acteurs se sont engagés sur ce marché : Oculus, Valve, Samsung, Google, Archos ou encore Starbreeze.

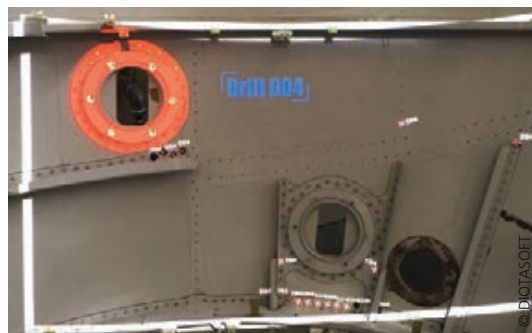
Les parcs d'attraction et l'industrie cinématographique exploitent également les technologies immersives pour proposer des univers 360°, plongeant le spectateur au cœur de l'action. La RV promet l'émergence d'un nouveau médium, à mi-chemin entre le cinéma et le jeu vidéo. Industrial Light & Magic (faisant partie de Lucasfilm Ltd.) s'engage ainsi dans cette voie en créant des scènes de la saga Star Wars en RV.

Les technologies immersives permettent d'innover dans le secteur des visites culturelles ou encore du tourisme. La RV permet par exemple de proposer des visites virtuelles de monuments disparus. La RA permet la reconstitution des parties détruites ou détériorées des monuments ou des œuvres d'art. Elle permet également d'afficher des informations ou des animations directement sur les œuvres.

La presse papier et l'édition commencent également à s'approprier la RA à travers des applications qui permettent d'enrichir les contenus imprimés. En 2012, le journal Ouest France, en partenariat avec Artefacto, a par exemple proposé à ses lecteurs une expérience de RA leur permettant de voir en 3D les photographies présentes dans les articles.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le marché des technologies immersives reste encore très émergent. Il profite d'un très fort dynamisme ces dernières années et les technologies se démocratisent de plus en plus, particulièrement dans les secteurs du divertissement et du tourisme.



Les technologies immersives représentent aujourd'hui un enjeu majeur comme l'a montré le Consumer Electronics Show (CES) de 2015 où de multiples dispositifs innovants les mettant en œuvre ont été exposés. Si le marché des technologies immersives est encore émergent, il profite d'un très fort dynamisme et d'une démocratisation croissante. En effet, les technologies immersives sont particulièrement diffusantes et elles peuvent trouver des applications dans toutes les sphères de notre quotidien.

Dans notre environnement toujours plus connecté l'accès à l'information contextualisée est un enjeu majeur. La RA répond à cette problématique de différentes manières. Elle permet la recherche et l'affichage en temps réel d'informations pertinentes en s'appuyant notamment sur Internet. Elle permet également la mise en valeur d'éléments importants de l'environnement. La RA constitue donc une aide à la prise de décision de l'individu en temps réel aussi bien dans un contexte personnel que professionnel. Cette technologie répond donc à des enjeux de productivité et de qualité.

La RV, en rendant possible l'immersion de l'utilisateur dans un environnement totalement virtuel, offre des applications inédites. Elle permet par exemple de plonger l'utilisateur dans un contexte psychologique et émotionnel différent, de créer des environnements sur mesure sans se préoccuper des coûts, ou encore d'éliminer les barrières géographiques. Cette technologie a ainsi un fort potentiel industriel pour la modélisation, la conception, les simulations ou encore la formation.

Les IHM répondent au besoin de trouver des moyens d'interaction plus intuitifs, plus ergonomiques, plus adaptés aux capacités perceptives, motrices et cognitives des utilisateurs ou encore plus précis. Dans

l'industrie, les IHM constituent un enjeu de productivité mais aussi de sécurité dans la réalisation des opérations. Dans le cas de la RA et de la RV, les IHM

sont un enjeu crucial car en faisant le lien entre le réel et le virtuel, elles sont garantes de la qualité de l'immersion.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les technologies immersives sont :

1	Matériaux avancés et actifs
2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5 ^{ème} génération
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
21	Supercalculateurs
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les technologies influencées par les technologies immersives sont :

2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
6	Infrastructures de 5 ^{ème} génération
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
21	Supercalculateurs
38	Systèmes de rénovation du bâti existant
40	Systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment
46	Nanoélectronique
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les marchés

Le marché des technologies immersives est émergent. Les solutions destinées au grand public restent rares et sont assez expérimentales.

Concernant la RV, la situation promet d'évoluer rapidement, notamment avec la sortie du casque Oculus Rift prévue en 2016. Le premier secteur d'application pour le grand public est le jeu vidéo. Selon le cabinet KZero (Royaume-Uni), 200 000 joueurs utilisent aujourd'hui des accessoires immersifs afin d'améliorer leur expérience de jeu, et ils atteindraient 57 millions en 2018, ce qui porterait le marché à 5,2 Md\$. Les autres marchés prometteurs sont les industries

créatives, culturelles et de loisirs avec notamment le cinéma, les salles de spectacle 360°, les visites culturelles ou encore les parcs d'attractions.

Le marché mondial de l'économie numérique lié à la RA est estimé à 95 Mds€ en 2020 dont 28 Mds€ pour les seules technologies numériques. Le nombre d'utilisateurs devrait atteindre 200 millions. Il est cependant difficile de donner des estimations précises dans la mesure où ces technologies sont très diffusantes et sont souvent combinées à d'autres. Les principaux marchés identifiés pour la RA sont : la santé, les industries créatives, culturelles et de loisirs et les marchés des applications professionnelles.

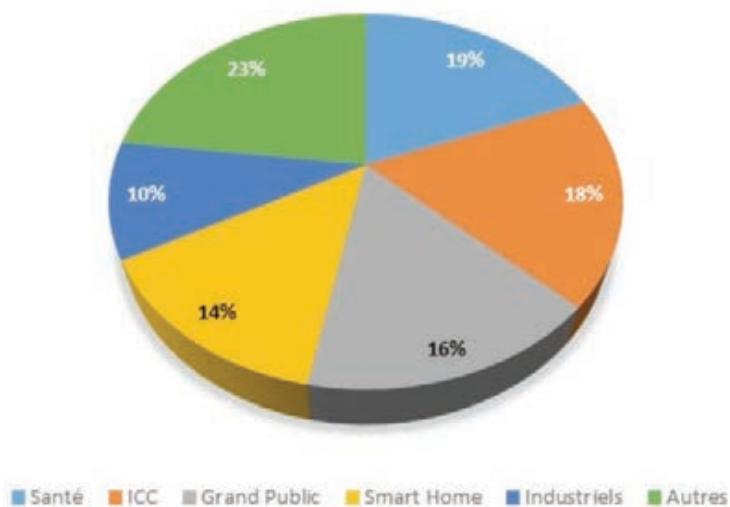


Figure 1 : Répartition du marché mondial de la RA en 2020¹

Le marché mondial des IHM devrait quant à lui atteindre 5,6 Mds€ en 2019 selon une étude *Transparency Market Research* prenant en compte les technologies résistives, capacitives, infrarouges, de communication champ proche et les technologies tactiles DST (Dispersive Signal Technology) dans leurs applications industrielles. Présentes sur tous les marchés, elles sont au cœur du renouvellement de l'expérience utilisateur.

Les défis technologiques à relever

■ Utilisation de composants à bas coûts

Le coût d'un casque de RV ou de lunettes de RA varie entre 300 et 800€. Un des enjeux de taille pour les fabricants est l'utilisation de composants à bas coût, comme les capteurs (position, tachymétrie, etc.) et les écrans légers pour *smartphone*.

■ Tracking, robustesse de la technologie et reconnaissance

Dans le cas de la RA, la reconnaissance d'image demeure un verrou technologique important. En effet, à l'heure actuelle, l'occultation d'une partie de l'objet, les déformations de ce dernier ou encore le manque de luminosité sont des freins importants.

¹ – Plan Réalité Augmentée, « Les marchés de la réalité augmentée en 2020 » : <<http://frenchaugmentedreality.fr/>>

Des améliorations matérielles (caméras RGBD, capteurs, chipsets RA, GPU, etc.) et logicielles (optimisation des algorithmes, augmentation de la fréquence de traitement des trames, etc.) sont nécessaires.

■ Affichage et latence

La qualité des optiques, la taille du champ de vision, l'amélioration de la vision périphérique, la suppression des troubles de perception dus à la parallaxe, la résolution par œil, la fréquence de rafraîchissement ou encore le temps de latence constituent des verrous technologiques importants.

■ Recalage et interaction entre les objets de synthèse et les objets réels

Le recalage reste un problème fondamental de la RA. Les interactions entre les objets de synthèse et les objets de la scène sont difficiles à gérer notamment en cas d'occultation. Il n'existe pas de solution simple pour superposer de manière précise une image au bon endroit dans le champ de vision de l'utilisateur sans utiliser de marqueurs.

■ Interface avec le cerveau – Brain Computer Interface

La question des IHM est centrale dans le cas des technologies immersives. Les interfaces cerveau-ordinateur ou BCI (Brain-Computer Interfaces) visent à permettre à l'utilisateur d'envoyer des informations uniquement grâce à son activité cérébrale. Les projets de casques électroencéphalogrammes (EEG) se multiplient. Les interfaces reposant sur l'implantation d'électrodes dans le cerveau, notamment dans le cas du traitement des personnes tétraplégiques, font l'objet de nombreuses recherches. L'usage de BCI robustes en RV pourrait à terme permettre de fluidifier le contrôle des applications de RV.

■ Interopérabilité des briques technologiques

Les technologies immersives, notamment la RA, peuvent être utilisées à partir de nombreux dispositifs (lunettes, tablettes, *Smartphones*) pour une même application. De nombreux paramètres, propres à chaque dispositif, comme la mémoire ou les systèmes d'exploitation sont alors pris en compte. Afin d'assurer une diffusion d'images de qualité et homogènes entre utilisateurs, il est essentiel de traiter la question de l'interopérabilité « multi-dispositifs » lors de l'intégration finale des technologies pour une seule et même application. Des travaux de normalisation à grande échelle sont souhaitables.

- Le décalage entre la réalité et la représentation virtuelle, source de cinétose

Les utilisateurs des casques de RV parlent souvent du mal des transports ou de *motion sickness* en anglais. Ce trouble, appelé cinétose, provoque des effets de nausée. Il est lié au décalage entre la réalité et le monde virtuel dans lequel l'utilisateur est immergé. La cinétose est considérablement réduite lorsque la « crédibilité » de l'univers virtuel visuel et sonore et des mouvements de l'utilisateur est élevée. Les progrès concernant le son 3D et les interfaces haptiques permettent d'adresser en partie ce verrou. Cependant les perceptions non-visuelles et auditives (accélération, toucher) constitueront des verrous beaucoup plus importants à lever.

- L'ergonomie

Le poids des lunettes de RA, leurs verres souvent épais et le risque de chauffe de certains modèles constituent des obstacles ergonomiques. Concernant les casques de RV, le poids est un verrou important dans la mesure où il entraîne rapidement une fatigue musculaire de l'utilisateur. Par ailleurs, dans de nombreux cas d'utilisation, il est nécessaire que le casque soit relié à l'ordinateur qui effectue les calculs par un système de câbles qui handicape les mouvements de l'utilisateur.

- Les modalités d'interaction

Les modes d'interaction proposés actuellement restent limités et souvent peu maniables à l'exemple des interfaces de contrôle parfois proposées sur les branches des lunettes de RA ou des manettes en RV. Les technologies permettant une interaction naturelle (geste, mouvement des yeux, voix, etc.) présentent un potentiel intéressant mais constituent également des verrous importants.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

- Convaincre les clients de la valeur ajoutée des technologies immersives

Le premier défi commercial concernant la RA et la RV consiste à convaincre les clients potentiels de la valeur ajoutée de ces technologies dont ils ont souvent une connaissance limitée. Comme pour la 3D, la question centrale est de savoir comment convaincre un consommateur d'acquiescer un matériel (souvent onéreux) dans le but de faire l'expérience de quelque

chose d'entièrement nouveau (expériences audiovisuelles interactives et immersives). Le défi consistera donc à aller au-delà de la niche de technophiles pour atteindre le grand public, masse critique nécessaire au développement de contenus et équipements coûteux. Pour cela, une « killer app » sera nécessaire.

- Développer les écosystèmes autour de ces technologies

Le développement d'écosystèmes et de plates-formes propriétaires constitue aussi un véritable défi. Les différents acteurs du secteur risquent de devenir dépendants des GAFA. Facebook a ainsi racheté Oculus, acteur historique de la RV. Apple a acquis Metaio, une startup allemande spécialisée dans la RA, en mai 2015. Fin 2014, Google a investi 542 millions de dollars dans Magic Leap, une startup qui souhaite révolutionner la RA. Par ailleurs, Google travaille sur plusieurs projets liés aux technologies immersives comme une version d'Android adaptée aux casques de RV ou encore une fonctionnalité de RA pour Google Maps.

- Favoriser les interactions entre acteurs de profils très variés et réunir les meilleures expertises

La structuration des acteurs aux profils et métiers très différents (éditeurs de presse, acteurs du tourisme, producteurs de contenus, fabricants de machines,...) et leur mise en relation constitue également un défi important. Elle est en effet nécessaire au développement d'une offre attractive intégrant : les producteurs de contenus, les fournisseurs de briques logicielles et les fournisseurs de hardware.

Cette révolution numérique doit pouvoir s'appuyer sur les pôles de compétitivité qui devront tous avoir une logique « transformation numérique » en accord avec les entreprises adhérentes. De plus, cela peut favoriser les rapprochements (capital ou autre) entre acteurs pour atteindre une taille critique sur des marchés mondiaux.

Les enjeux réglementaires

- Propriété intellectuelle des œuvres

Les dispositifs de RA, en superposant l'information à une captation vidéo en temps réel de l'environnement ou en la calant sur une image source suscitent des questions en termes de propriété intellectuelle des œuvres.

- Données personnelles et droit à l'image

Les technologies immersives systématisent des débats préexistants. Les lunettes de RA collectent à la fois des données très précises sur leur utilisateur mais aussi sur toutes les personnes et les lieux qu'il côtoie à travers la captation vidéo et l'utilisation d'images sources. Les IHM du type EEG sont également confrontées à la problématique des données personnelles et posent des questions éthiques.

■ Santé

L'ANSES a émis des *recommandations* concernant les dispositifs de RA et de RV comme les Google Glass ou encore l'Oculus Rift en soulignant notamment les risques de fatigue visuelle ou encore de troubles sensoriels importants notamment chez les enfants.

De manière générale, les technologies immersives visuelles présentent des risques liés à l'épilepsie.

■ Sécurité

Les problématiques de sécurité concernent principalement la RA. Les erreurs de logiciel ou les erreurs d'interprétation des données peuvent générer des instructions erronées. Cela peut s'avérer dangereux par exemple dans le cas de la conduite automobile assistée par RA. De manière générale, les lunettes de RA peuvent déconcentrer l'utilisateur et créer des interférences dangereuses sur le plan sensoriel (par ex : l'affichage d'objets virtuels diminuant le champ de vision).

Analyse AFOM

ATOUTS

Le poids du cinéma français en production et au box-office (1^{er} européen).

La place des acteurs du jeu vidéo, souvent à la pointe en matière de technologies et de contenus.

Les formations dans le gaming sont bien en place au niveau national : Supinfogame à Valenciennes est déjà mondialement réputée pour la formation dans les jeux vidéo.

La France demeure toujours la première destination touristique mondiale.

La qualité des laboratoires de recherche.

Un tissu de startups fournisseuses de technologies innovantes.

De grands groupes donneurs d'ordres dynamiques (Thalès, Dassault, Orange, etc.) et développeurs de technologies.

Des institutions publiques volontaires pour s'impliquer dans la mise en place de démonstrateurs.

Des fournisseurs de contenus motivés par les technologies immersives.

FAIBLESSES

Cinétose provoquée par la RV. Difficulté à produire des retours haptiques réalistes.

Fragmentation de la filière.

Manque de connaissances du public.

OPPORTUNITÉS

Le tourisme : un potentiel de valorisation majeur.

Le caractère émergent du marché de la RA et de la RV.

Les actions menées dans le cadre de la Nouvelle France Industrielle

IHM innovantes promues par les jeux vidéo et pouvant être réutilisées dans d'autres secteurs.

MENACES

Enjeux liés à la propriété intellectuelle : technologie de l'image.

Une industrie de contenus de plus en plus dépendante des fournisseurs de technologies.

Prédominance des grands groupes (GAFA) qui développent des plateformes et des environnements logiciels propriétaires.

Restrictions réglementaires sur la sécurité d'utilisation et la santé.

Rejet de la part des utilisateurs.

Problématiques liées au droit à l'image et aux données personnelles.

Facteurs clés de succès et recommandations

La plupart de ces technologies (RV, 3D) sont issues d'autres secteurs (notamment le militaire). La France doit profiter de ses compétences dans la production de contenus (cinéma, jeu vidéo,...) pour pousser ces technologies.

- Convaincre de l'intérêt des technologies immersives

Un véritable travail d'évangélisation doit être réalisé notamment via des démonstrateurs afin de qualifier, de quantifier et communiquer sur la valeur ajoutée de ces technologies.

- Structurer la filière

Sans la mise en relation des différents acteurs (pôles de compétitivité, fournisseurs, utilisateurs...), l'offre en termes de technologies immersives ne peut pas se développer. Il est ainsi important de susciter des partenariats entre les sphères métiers et technologiques, et d'encourager la réalisation d'applicatifs.

- Développer l'offre française

Il est important de développer une offre industrielle française, et de favoriser l'émergence de champions nationaux. Cela doit s'accompagner d'un passage à l'échelle de nos nombreuses startups, notamment grâce à des travaux d'interopérabilité et de normalisation.

- Renforcer les échanges entre le milieu académique, la recherche et l'entreprise

Les technologies immersives ouvrent la voie à de nouveaux usages et de nouvelles applications. Il est toutefois essentiel d'améliorer les échanges entre la recherche, plutôt avancée au niveau national, et les entreprises.

- Proposer des technologies matures

Afin de ne pas provoquer un rejet durable de la part des utilisateurs, les technologies immersives proposées doivent être suffisamment matures et offrir une expérience aboutie.

- Créer des expériences et des contenus spécifiques à la RA et la RV

Il est essentiel de montrer l'intérêt de ces technologies en soulignant leur indépendance vis-à-vis des supports et des médias traditionnels. Le développement de « killer applications » constitue un levier privilégié.

- Renforcer l'acceptabilité sociale

Les technologies immersives et plus particulièrement la RA ne peuvent pas se développer sans l'adhésion des utilisateurs. La question de l'acceptabilité sociale doit donc être posée en amont afin d'éviter une situation de rejet comme cela a été le cas pour les Google Glass.

Acteurs clés

Entreprises	3D sound Labs, Artefacto, Atos, Augmentedev, Catopsys, Diotasoft, Dassault Systemes, DCNS, Laster, Orange, Optinvent, Starbreeze Thales Research and Technology,...
IRT, ITE, IHU	B-COM
Instituts Carnot	CEA LIST, INRIA...
Autres centres de recherches	Centre interdisciplinaire de réalité virtuelle, GRETA (Telecom ParisTech), Institut d'informatique appliquée, Le2i, Rubika, Systèmes et Transports (Université de Technologie de Belfort-Montbéliard)...
Pôles de compétitivité	CapDigital, Images et Réseaux, Imaginove, Systematic...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	CLARTE, Salon Laval-Virtual...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

15 Procédés relatifs à la chimie du pétrole

Loisirs & Culture
ÉNERGIE, MOBILITÉ, Numérique
Environnement, HABITAT, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, Sécurité
Alimentation

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Pétrole, raffinage, pétrochimie,
distillation atmosphérique,
procédés de conversion,
hydrocraquage, conversion
profonde, procédés de mélange,
vapocraquage, polymérisation.



© TOTAL - Marco DuFour

Définition et périmètre

Définition

La transformation du pétrole en produit commercialisable se décompose en deux grandes activités : le **raffinage** et la **pétrochimie**. La première consiste à séparer les diverses coupes du pétrole dans l'objectif de les transformer en produits intermédiaires et commerciaux.

La seconde consiste principalement à transformer la coupe naphta ou la coupe éthane, issue du raffinage, en oléfines, aromatiques et plastiques.

Technologies

Des technologies spécifiques et utilisées successivement permettent de mettre en œuvre ces deux activités :

Raffinage	Distillation atmosphérique : sous l'effet d'une pression proche de l'air ambiant, séparation des différentes couches pétrolières (butane, propane, kérosène, essence, fioul, etc.). Les différents produits peuvent ensuite être récupérés ¹ .
	Procédés de conversion : modification de la structure chimique des coupes pétrolières. Ils incluent les procédés suivants : Craquage et hydrocraquage catalytique : transformation des molécules lourdes en produits plus légers ; Conversion profonde : production de fiouls lourds en hydrocarbures légers.
	Procédés de traitement poussé : neutralisation / élimination des composants néfastes pour l'environnement et la santé.
	Procédés de mélange : mélange des produits intermédiaires selon des spécifications techniques prédéfinies ² . Des appareils doseurs sont utilisés pour se conformer à ces spécifications.
Pétrochimie	Vapocraquage : cassage des hydrocarbures du naphta en molécules légères et insaturées (éthylène, propylène, hydrocarbures insaturés).
	Polymérisation : transformation des molécules issues du vapocraquage en polymères (polyéthylène, polypropylène, etc.).

Ces technologies ont été développées depuis les années 1970 pour les plus récentes. De ce fait, l'innovation dans le domaine de la chimie du pétrole porte principalement sur **leur optimisation**, en particulier dans trois champs¹² :

- L'utilisation de **types de bruts jusque-là moins valorisés**, comme les coupes lourdes ;
- L'amélioration des **propriétés des produits** : ajout d'additif (par exemple pour améliorer le rendement des moteurs à combustion), production de polymères métallocènes³ et polymères de spécialité⁴

s'appuyant sur des procédés avancés de polymérisation, etc. ;

- La diminution de leur **impact environnemental** : utilisation de technologies de gestion des données massives, technologies de recyclage, etc.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le raffinage et la pétrochimie sont des **maillons indispensables de l'industrie**. Ces activités sont essentielles au secteur de la chimie, qui utilise ses produits, puis plus en aval aux secteurs applicatifs de l'automobile, de l'électroménager, de la santé ou encore de la construction, avec des enjeux en termes de compétitivité et d'emploi. Selon l'Union Française des Industries Pétrolières (UFIP)⁵, l'industrie pétrolière générerait 200 000 emplois directs ou indirects en France, dont 30 000 emplois pour le raffinage.

1 – Si le naphta est utilisé en pétrochimie, les autres produits issus du raffinage, qui représentent 90 % des produits raffinés, trouvent des applications multiples. Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) constitue un carburant pour les véhicules à gaz, l'essence et le gazole pour les véhicules automobiles et le kérosène pour l'aviation ; les gaz butane et propane sont utilisés à des fins domestiques ; les huiles permettent la fabrication de lubrifiants ; le fioul domestique sert comme combustible de chauffage ; le fioul lourd alimente certains bateaux ; enfin, le bitume recouvre les routes

2 – En France, ces spécifications ont été définies par une série d'arrêtés (3 septembre 1979 pour le propane par exemple)

3 – Polymères dérivés de la catalyse à site unique ayant émergé dans les années 1990

4 – Polymères répondant à des besoins très spécifiques, obtenus par polymérisation radicalaire ou condensation

5 – UFIP, 2012 : *L'industrie pétrolière en France – Contribution au débat sur l'énergie*

Pour capter un marché des technologies du raffinage et de la pétrochimie attractif, la France dispose d'un **leader sur le marché** (Total) et du **deuxième secteur exportateur parapétrolier au monde**⁶. Le pays bénéficie ainsi d'excellentes capacités d'investissement industriel.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés suivantes ont une influence sur les procédés de la chimie du pétrole :

■ **Procédés relatifs à la chimie verte** (influence forte) : la pétrochimie fait également face à la nécessité de réduire son empreinte environnementale et sanitaire. En ce sens, les avancées de la chimie verte dans le domaine du génie et de la chimie des procédés peuvent lui permettre de réduire l'impact de ses procédés sur le plan environnemental ;

■ **Valorisation et intelligence des données massives** (influence faible) : ces technologies commencent à être utilisées pour l'optimisation des procédés de la chimie du pétrole ;

■ **Recyclage des métaux rares et terres critiques** (influence faible) : les procédés génèrent des déchets contenant des métaux rares encore peu valorisés ;

■ **Robotique autonome** (influence faible) : les raffineries commencent également à mettre en œuvre ce type de technologies pour améliorer leur efficacité ;

■ **Technologies de récupération de chaleur à basse température** (influence faible) : elles peuvent contribuer à diminuer l'empreinte environnementale des procédés de la chimie du pétrole.

Les procédés de la chimie du pétrole ont à leur tour une influence forte sur les **matériaux avancés et actifs**, dans la mesure où ils fournissent les polymères composant nombre d'entre eux.

Les marchés

Principaux acteurs

Connaissant une série de fusions-acquisitions depuis le milieu des années 90, l'industrie du pétrole s'est concentrée autour de **grandes compagnies**

6 – L'Usine Nouvelle, 07/03/2013 : « Les perles françaises du pétrole »

pétrolières privées : Exxon Mobil, Shell, Total, BP, Chevron ou encore Conoco, côtoyant des **compagnies nationales puissantes** comme Nioc (Iran), Cnpc (Chine), Petrobras (Brésil) ou Petronas (Indonésie). Les dernières années ont vu par ailleurs la montée en puissance des groupes pétroliers russes (Lukoil, BP-TNK, Gazprom, etc.) et des compagnies du Moyen-Orient (Saudi Aramco, Sabic, etc.). Toutes ces entreprises intègrent généralement les activités de l'exploitation à la pétrochimie⁷. Cependant, il existe également des acteurs qui ne traitent que de la partie raffinage et/ou pétrochimie, telles des sociétés chimiques comme Ineos.

Les structures et technologies utilisées par ces pétroliers dans les domaines du raffinage et de la pétrochimie sont développées pour partie en propre, et pour partie par les entreprises du **secteur parapétrolier**⁸. Ces dernières comprennent des grands groupes de nationalité américaine, française, britannique ou norvégienne. Dans son ensemble, le marché parapétrolier était estimé à 216 milliards de dollars en 2015 et il pourrait passer à 339 milliards de dollars en 2019⁹.

Dynamiques de marché

Les technologies du raffinage et de la pétrochimie devraient continuer de bénéficier de la **prépondérance du pétrole au niveau mondial**. En 2014, le pétrole restait la première énergie avec 32,6 % de la consommation totale d'énergie¹⁰. L'essor des substituts biomasse, le développement rapide du gaz naturel et l'abondance du charbon ne devraient pas remettre en cause cette situation à l'horizon 2020¹¹. D'ici là, la demande en pétrole devrait même progresser plus rapidement que l'offre, selon des prévisions récentes de l'Agence Internationale de l'Énergie (février 2015). De 92,4 millions de barils par jour (mbj) en 2014, la consommation pourrait ainsi passer à 99,1 mbj en 2020.

7 – IFP Énergies nouvelles

8 – Ces entreprises comprennent des bailleurs de licence, qui ont la détention légale des procédés, les entreprises d'ingénierie de la construction et les entreprises d'appui à l'exploration et à la production

9 – Douglas Westwood, 2015 : *World Oilfield Services Market Forecast 2015-2019*

10 – BP, 2015 : *Statistical Review of World Energy*

11 – Les industriels du pétrole cherchent d'ailleurs à diversifier leurs activités en se tournant vers ces 2 ressources (gazochimie, carbochimie), et également vers la biomasse

Selon l'UFIP¹², les **capacités de raffinage** en Europe ont baissé de 13 % entre 2007 et 2013. Pour les fournisseurs de technologies de raffinage, le potentiel sur ce marché réside donc principalement dans l'**optimisation des infrastructures existantes**, notamment sur un plan environnemental. Avec un phénomène de rapprochement des capacités de raffinage des sites d'exploitation du pétrole, la demande en technologies de raffinage devrait être tirée à l'horizon 2020 par l'**Asie et le Moyen-Orient**, qui concentrent actuellement 80 % des projets¹³, l'Amérique du Nord, l'Amérique latine et la Russie.

La pétrochimie représente actuellement **10 % de la demande en brut**, et ce ratio pourrait passer à 13 % en 2030¹⁴. D'ici 2020, le marché pourrait progresser d'environ 7 % par an selon certains analystes¹⁵. Le marché des technologies de la pétrochimie devrait être tiré par l'industrie pétrochimique américaine, bénéficiant d'un éthane à bas prix coproduit de l'exploitation des pétroles et gaz de schiste¹⁶, par les pays asiatiques (notamment la Chine) et par les pays du Moyen-Orient. Sur un marché européen en difficulté, l'enjeu constituera principalement à moderniser des installations pétrochimiques vieillissantes. À titre d'exemple, 90 % des vapocraqueurs européens ont plus de 30 ans¹⁷.

Les défis technologiques à relever

Étendre les types de pétroles bruts exploités

La tendance est à un **élargissement des types de pétroles bruts exploités**. D'une part, la valorisation des coupes lourdes constitue un défi de premier plan. En particulier, le traitement de bruts lourds plus soufrés impose de perfectionner les technologies de désulfuration¹⁸ et l'amélioration des technologies de conversion profonde et d'hydrocraquage est nécessaire.

12 – Union Française des Industries du Pétrole

13 – Le Monde, 13/08/2014 : « De nouvelles raffineries européennes menacées de fermeture »

14 – Données de Total

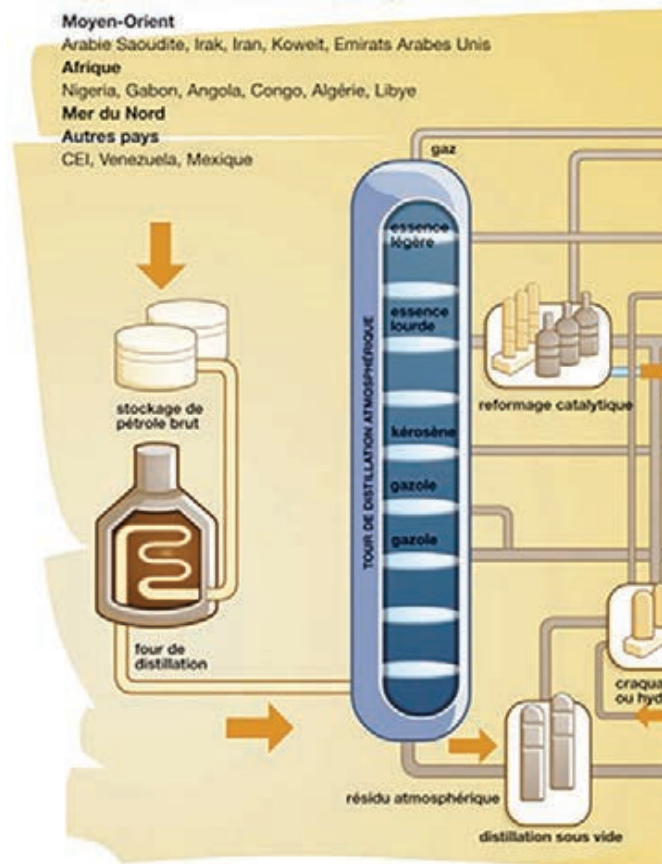
15 – Transparencymarketresearch, 2014 : *Petrochemicals Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Outlook, Trends and Forecast 2014 – 2020*

16 – Entre 2008 et 2012, le prix du naphta a augmenté de 19 % en Europe tandis que le prix de l'éthane chutait de 55 % aux États-Unis. IFRI, 2013 : *La révolution des pétroles de schiste aux États-Unis*

17 – La Croix, 30/03/2014 : « Les difficultés du raffinage et de la pétrochimie européenne »

18 – Les pétroliers sont en effet tenus de proposer des produits aux teneurs en soufre faibles pour respecter des normes environnementales toujours plus strictes

Approvisionnement en pétrole brut

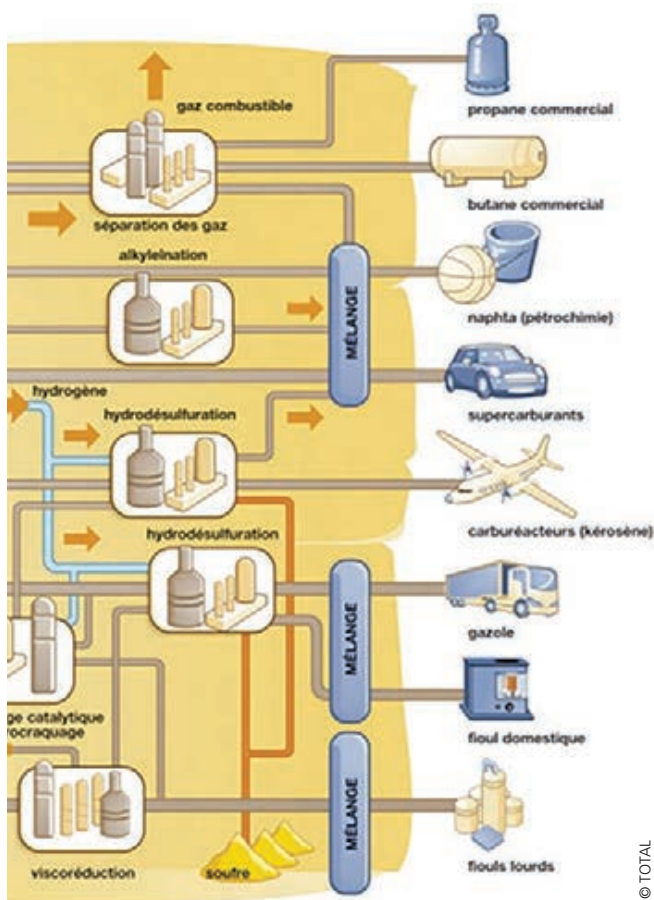


D'autre part, le raffinage de **bruts à la composition de plus en plus variable**, particulièrement les pétroles non conventionnels, nécessite de flexibiliser les outils de production. L'exploitation des gaz de schiste demande notamment de faire évoluer les équipements de vapocraquage, principalement basés sur le naphta en Europe, pour pouvoir transformer l'éthane contenu dans ces gaz¹⁹ en éthylène puis en polyéthylène.

Certains acteurs en Europe se sont déjà lancés dans l'importation d'éthane depuis les États-Unis et la conversion de leur vapocraqueur²⁰. Cette situation pourrait jouer sur l'approvisionnement en propylène et butadiène, dans la mesure où le craquage de l'éthane en produit en quantité moindre par rapport à celui du naphta. De nouveaux process chimiques devraient alors être mis en service à grande échelle pour répondre à ces tensions.

19 – Les gaz de schiste contiennent des proportions importantes d'éthane.

20 – Industrie.com, 13/10/2014 : « De l'éthane américain craqué à Mardyk »



© TOTAL

Améliorer les produits finis

Les pétrochimistes se penchent également sur l'**amélioration des propriétés des polymères**, pour les adapter notamment à la chimie de spécialité. Ces recherches nécessitent des procédés avancés de polymérisation ou des procédés de traitement de surface adaptés.

Vers une optimisation énergie/matière des procédés

La **diminution de l'empreinte environnementale des procédés du pétrole** constitue un autre enjeu technologique. Elle passe par l'amélioration de leur efficacité (quantité d'énergie et de matières consommées), mais également par l'intégration de nouvelles sources (végétaux, déchets chimiques, etc.) et la limitation des effluents (recyclage des déchets, valorisation des eaux usées, etc.). Des gains aussi bien écologiques qu'économiques peuvent en être attendus²¹ et des

21 – L'énergie représente par exemple plus de la moitié des coûts opératoires de Total pour ses activités de raffinage

progrès concrets ont déjà été réalisés²². Les technologies de captage, transport et stockage du CO₂ restent toutefois encore largement exploratoires.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Capter un marché mondial

Le marché des technologies du pétrole est international²³. De ce fait, à l'horizon 2020, l'un des principaux enjeux pour les entreprises françaises est de se **projeter sur les marchés porteurs**. Cela implique notamment de s'inscrire dans les projets de raffineries conduits dans les pays du Golfe et en Asie, en s'appuyant au besoin sur des partenariats avec des entreprises étrangères. À titre d'exemple, le groupe Total s'est associé fin 2012 avec le pétrolier qatari Industries Qatar pour développer dans ce pays du Moyen Orient l'une des plus grandes usines de polyéthylène basse densité au monde.

Développer des technologies alliant performance et rentabilité

Sur les marchés européens, le potentiel de croissance porte davantage sur l'**amélioration des infrastructures existantes**. Des **équilibres économiques** restent néanmoins à trouver. Pour les raffineurs et pétrochimistes, l'achat de droits d'émission via le système européen d'échange de quotas reste souvent plus avantageux sur le plan économique que la mise en place de dispositif de réduction de CO₂. Cette situation incite souvent peu les industriels à privilégier la seconde solution, pourtant plus écologique. L'amélioration de la rentabilité des technologies environnementales constitue ainsi un défi de premier plan.

Le besoin de différencier l'offre pétrochimique

Par ailleurs, les **pétroles non conventionnels** permettent aux pétrochimistes des pays exploitants, les États-Unis au premier chef, de bénéficier d'une matière première moins chère, avec pour effet d'accroître leur compétitivité et de redéfinir les équilibres mondiaux. Cette nouvelle donne pourrait pousser la pétrochimie européenne à **différencier de plus en plus son offre**, en se tournant par exemple davantage

22 – À titre d'exemple, les émissions de composés organiques volatils issues du raffinage ont été diminuées par 2 entre 1990 et 2009, selon l'UFIP

23 – Le secteur parapétrolier français réalise notamment plus de 90 % de son chiffre d'affaires à l'étranger

vers la **chimie de spécialité**²⁴. Dans ce domaine, la concurrence des industries pétrochimiques des pays du Golfe pourrait toutefois s'intensifier à l'avenir. Ces industries bénéficient en effet de leur proximité avec les gisements de matières premières et avec les débouchés des pays asiatiques.

Les enjeux réglementaires

Au niveau mondial, un **renforcement des normes de qualité** est observé, ce qui devrait jouer en la faveur du développement de technologies toujours plus performantes

Au niveau européen, les activités pétrolières sont encadrées par une réglementation de plus en plus stricte en matière de sécurité environnementale et sanitaire (règlement REACH²⁵, directive IED²⁶, Directive SEVESO²⁷, etc.). Ces réglementations créent des effets d'**obsolescence accélérée** de certains outils de production. Son renforcement devrait continuer de nécessiter des investissements conséquents de la part des industriels pour y faire face.

Analyse AFOM

ATOUTS

De fortes capacités d'investissement et de projection à l'international des compagnies pétrolières

Une industrie parapétrolière occupant le deuxième rang au niveau mondial en termes d'exportations

Un vivier de start-up et de PME innovantes

FAIBLESSES

Une diminution progressive des capacités de raffinage en Europe

Une industrie pétrochimique européenne en difficulté

OPPORTUNITÉS

Un dynamisme de la demande en pétrole dans les marchés émergents

Des projets importants de raffinage et de pétrochimie au Moyen-Orient, en Asie et en Amérique du Nord

Des possibilités de différenciation pour les entreprises françaises sur les marchés de la valorisation de nouvelles matières premières

MENACES

Une concurrence forte, notamment de grands groupes américains ou britanniques

À plus long terme, le développement des énergies renouvelables et du véhicule électrique

24 – La relative faiblesse de la chimie de commodités européenne par rapport aux pays comme les États-Unis ne devrait pas représenter une menace pour la chimie de spécialité. Celle-ci mobilise des volumes faibles de produits issus de la chimie de commodités, qui pourraient être importés

25 – Entrée en vigueur en 2007, cette procédure encadre étroitement l'utilisation de substances chimiques

26 – Cette directive encadre les émissions industrielles. Elle a été transposée dans le droit français en 2013

27 – Cette directive impose aux États-Membres d'identifier les sites présentant des risques industriels majeurs. La directive Seveso 3 s'applique depuis le 1^{er} juin 2015

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

- Accompagner la mutation environnementale de l'industrie pétrolière française en renforçant le soutien à l'innovation ;

Aux entreprises :

- Se développer sur les marchés avec une forte composante innovation, dans les domaines notamment de :

- La performance environnementale ;
- La valorisation de nouvelles ressources.

Aux académiques :

- Amplifier les projets de recherche sur l'efficacité des procédés, dans la lignée par exemple des travaux de recherche conduits par l'IFP Energies Nouvelles sur les procédés de transformation d'oléfines.

Acteurs clés

La France dispose d'entreprises puissantes aussi bien dans l'industrie pétrolière que parapétrolière. Selon le classement Fortune Global 500, le groupe Total se plaçait notamment au sixième rang mondial en 2014 en termes de chiffres d'affaires. Ces entreprises incluent :

- Compagnies pétrolières : Total, Engie, Maurel & Prom, Perenco, Dyneff, etc. ;
- Grands groupes parapétroliers : CGG, Technip, etc. ;
- Autres grands groupes : Air Liquide, Arkema, etc. ;
- PME parapétrolières : Axens, Doris Engineering,

ECA, Dietswell, Geostock, Bardot, Emc3, Saltel, etc. ;

- Start-up : Pyrum Innovations, Global Buienergies, CIMV, Neodyss, etc.

Elles sont regroupées pour la plupart d'entre elles au sein d'un certain nombre d'organisations professionnelles comme l'Union Française de l'Industrie Pétrolière (UFIP), elles-mêmes regroupées au sein du Comité Professionnel du Pétrole (Cpdp).

Au niveau de la recherche, la France accueille également des structures d'excellence comme l'IFP Energies Nouvelles, le pôle AXELERA ou encore les instituts Carnot BRGM et ISIFoR.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

16 Recyclage des métaux critiques et terres rares

Loisirs & Culture
Énergie, MOBILITÉ , Numérique
ENVIRONNEMENT , Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE , Sécurité
Alimentation

► **Correspond à une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Métaux critiques, déchets d'équipements électriques et électroniques, métaux stratégiques, terres-rares, recyclage, récupération par précipitation, fonte haute-température, extraction par solvant, décrépitation à l'hydrogène, biométallurgie, opérateurs de collecte, sécurité environnementale, économie circulaire



© Solvay photolibrary

Définition et périmètre

Définition

Un métal est dit « critique » lorsqu'il répond à deux critères :

- Il joue un **rôle clé sur le plan économique** (importance dans la chaîne de valeur de certains produits, poids économique des secteurs industriels consommateurs, faible substituabilité) ;
- Son approvisionnement peut être soumis à des **tensions**, voire des contrôles à l'exportation.

Ces caractéristiques font varier la liste des métaux critiques dans le temps et selon les zones géographiques. Pour la zone Europe, la Commission Européenne a publié en 2010¹ une liste de **quatorze métaux qualifiés de « stratégiques »**, qui inclut l'antimoine, l'indium, le béryllium, le magnésium, le cobalt, le niobium, le fluor, les platinoïdes, le gallium, le germanium, le tantale, le graphite, le tungstène et enfin un ensemble de dix-sept éléments chimiques dits « terres rares »², produits par la Chine à hauteur de 98 %.

Applications

Les métaux critiques entrent tous dans la composition de produits de **haute technologie**, en premier lieu dans le domaine des TIC³ : circuits intégrés, infrarouge militaire, batteries, transistors, retardateurs de flammes, écrans tactiles, condensateurs, etc. Certains d'entre eux sont également utilisés dans les domaines de la métallurgie (indium, magnésium, graphite, titane, etc.) pour des applications automobile et aéronautique, de l'optique (germanium) voire de la médecine pour l'antimoine et le gallium. Ils sont aussi très présents dans les applications énergie et transport (dysprosium, lithium, néodyme, palladium, platine, etc.).

L'enjeu du recyclage

Le taux de recyclage de ces métaux a été évalué dans un rapport du Programme des Nations-Unies pour l'Environnement publié en 2011⁴. Parmi les 60 maté-

riaux étudiés au total, seuls **dix-huit** avaient un **taux de recyclage supérieur à 50 %**. Cette situation s'explique par leur **dispersion** dans une grande diversité de produits, au sein desquels ils ne sont présents qu'en très faible quantité. Stratégiques pour l'économie mais difficilement valorisables en fin de vie, leur recyclage constitue ainsi un enjeu de premier plan.

Les technologies actuelles

Elles varient selon les types de déchets et/ou métaux traités. Certaines d'entre elles ont déjà été développées **à l'échelle industrielle**. Elles incluent par exemple des procédés de recyclage par attaque chimique et récupération par précipitation pour les poudres luminescentes. Les éléments contenus dans les batteries peuvent également être récupérés grâce à une fonte à haute température et des procédés d'hydro-pyrometallurgie. D'autres sont encore **exploratoires**. Des techniques d'extraction par solvant sont étudiées pour le recyclage des tubes cathodiques. Pour les aimants permanents, les recherches portent notamment sur l'extraction en phase gazeuse et le retraitement après décrépitation à l'hydrogène. Pour les cartes électroniques, elles portent sur des procédés d'attaque d'eau supercritique. La biométallurgie⁵ s'inscrit également au sein des programmes de R&D de certains industriels.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le recyclage des métaux critiques constitue pour la France et l'ensemble des pays importateurs un **sujet de sécurité d'approvisionnement**. Le développement de ces technologies constitue l'opportunité de réduire leur dépendance vis-à-vis des pays exportateurs et de diminuer les tensions sur le marché des métaux critiques.

Avec d'autres pays comme les États-Unis et le Japon, la France s'inscrit parmi les **leaders** sur ce marché émergent. Son territoire accueille des infrastructures de recyclage de premier plan au niveau européen, en particulier une unité de séparation dédiée aux terres rares⁶ et des unités de métallurgie de métaux stratégiques (antimoine, tungstène, etc.). Portée aussi bien

1 – Commission Européenne, 2010 : *Critical Raw Materials for the EU*, actualisée en 2014

2 – Ces éléments sont le scandium, l'yttrium, et les 14 lanthanides stables : lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium et lutétium

3 – Technologies de l'information et de la communication

4 – PNUE, 2011 : *Recycling Rates of Metals*

5 – Utilisation de microorganismes pour la valorisation des métaux

6 – La France accueille notamment à la Rochelle l'une des 2 seules usines de séparation des terres rares en Europe

par le secteur public que privé, la R&D est particulièrement dynamique.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés suivantes ont pour l'instant une influence faible sur le recyclage des métaux critiques et des terres rares :

- **Métaomique** : elle peut permettre de mieux comprendre l'impact de certains agents sur les métaux critiques et ouvrir de nouvelles voies pour leur recyclage ;
- **Modélisation, simulation et ingénierie numérique** : le développement des procédés de recyclage des métaux critiques repose en partie sur des technologies de modélisation.

Les marchés

Le recyclage des métaux critiques représente actuellement un **marché émergent**, dont le potentiel de développement reste mal évalué. Dans les produits en fin de vie, le recyclage est encore limité aux métaux ayant une très forte valeur comme le platine, le palladium et le cobalt⁷. En 2010, l'ADEME ajoutait également à cette courte liste le lithium issu des accumulateurs lithium-ion ainsi que les terres rares contenues dans les lampes fluo-compactes⁸. Plusieurs éléments laissent néanmoins présager une **montée en puissance des activités de recyclage** à l'horizon 2020.

Tout d'abord, **l'arrivée sur le marché d'un nombre toujours plus élevé de produits en fin de vie** générera de nouveaux gisements de déchets qu'il conviendra de traiter. Avec 41,8 millions de tonnes en 2014 contre 39,8 millions de tonnes en 2013⁹, les déchets électriques et électroniques (DEEE), premier contenant de métaux critiques, ont atteint un nouveau pic au niveau mondial¹⁰. Leur volume devrait continuer de progresser de manière exponentielle à l'horizon 2020. En France, les opérateurs de traitement

7 – Géologues, n°170, 16/10/2012 : « Le défi des métaux critiques »

8 – ADEME, 2010 : *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*

9 – Université des Nations-Unies, 2015 : *The Global E-waste Monitor 2014: Quantities, Flows and Resources*

10 – Moins d'un sixième de ces déchets étaient recyclés, alors même qu'ils renfermeraient pour près de 47 milliards d'euros de fer, cuivre, or, argent ou aluminium, amenant le sous-secrétaire général des Nations-Unies M. David MALONE à évoquer une « mine urbaine »

attendent ainsi une multiplication par 5 des déchets de DEEE qu'ils collectent dans les 5 années à venir¹¹.

Ensuite, la **structure de l'offre en métaux critiques** devrait renforcer la pertinence du recyclage dans les prochaines années.

- D'une part, la production est **concentrée** dans un petit nombre de pays. La Chine n'assure pas moins de 97 % de la production en terres rares et de 50 % de la production de 7 autres métaux critiques¹². Le Brésil bénéficie également d'une situation quasi-monopolistique pour l'extraction du niobium. Les pays fortement consommateurs de biens intégrant des métaux critiques – y compris la France – devraient ainsi être fortement motivés à améliorer le recyclage pour réduire leur dépendance de ces quelques pays exportateurs ;
- D'autre part la hausse des coûts d'exploitation¹³ et les contraintes environnementales toujours plus vives tendent à **limiter le potentiel de production¹⁴, tandis que la demande devrait continuer de croître rapidement, générant des tensions d'approvisionnement**.

Enfin, le recyclage des métaux critiques fait l'objet d'**initiatives de promotion d'ampleur internationale**. Pour des raisons principalement écologiques¹⁵, le Panel International des Ressources¹⁶, hébergé par le Programme des Nations-Unies pour l'Environnement, soulignait l'urgence de recycler les métaux dans 2 rapports publiés en 2013¹⁷. Ces démarches politiques favorisent l'émergence d'un marché du recyclage à l'horizon 2020.

Les défis technologiques à relever

Le recyclage des métaux critiques rencontre plusieurs verrous sur le plan technique qui entraînent la perte de volumes importants de matières premières.

11 – Arrêté du 31 mars 2015

12 – Données du BRGM

13 – Celle-ci est notamment provoquée par l'exploitation de gisements de qualité moindre, en raison de la raréfaction des ressources

14 – Analyse de MTL Index

15 – Le recyclage des métaux critiques permet de réduire significativement le coût environnemental et énergétique de leur utilisation par rapport à l'extraction minière

16 – Créée en 2007, ce panel produit une évaluation scientifique indépendante sur l'exploitation des ressources naturelles et leur impact environnemental

17 – PNUE, 2013 : *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure and Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*

Des gisements éparpillés



En amont, la **dispersion** et la **faible teneur** des métaux critiques dans les déchets recyclés complexifient la collecte. Avec les industriels et les opérateurs de collecte, elles nécessitent de mettre en place des **filières de collecte structurées** qui soient adaptées à la fois à la diversité des déchets concernés et des métaux critiques. En partie en l'absence de telles filières, en 2011, moins de 1 % des terres rares étaient recyclées au niveau mondial¹⁸.

Au niveau du tri, la **mesure de la teneur en matériaux critiques des déchets** reste un enjeu. Les instruments de mesure ne permettent pas systématiquement une évaluation documentée du gisement potentiel.

La difficulté du traitement de mélanges complexes

Lors du traitement, les **mélanges complexes et les alliages** constituent des défis pour les technologies actuelles¹⁹. À titre d'exemple, le béryllium contenu dans les circuits électroniques, utilisé en alliage avec le cuivre, ne peut être récupéré lors du recyclage.

Un outillage difficile à rentabiliser

Les équipements de recyclage étant généralement spécifiques à un métal, leur viabilité doit être mise en regard des **flux accessibles**. Par ailleurs, la modification de la composition de certains déchets limite la taille des flux homogènes et nécessite de faire évoluer au même rythme les outils de traitement. Par exemple, les cartes électroniques contiennent toujours plus de plastiques et de composés nouveaux ; en conséquence,

les fonderies de cuivre qui en assurent le traitement peinent à s'y adapter.

■ **Les défis commerciaux et d'usage à relever**

Le financement du recyclage : un enjeu central

En France, la **question du financement** reste clé pour le recyclage des métaux critiques, et ce à double titre.

■ D'une part, l'absence de recyclage à une échelle industrielle pour la plupart des métaux ne permet pas le développement de **filières de recyclage rentables**. En particulier, leur dispersion au sein d'une diversité de produits génère encore des coûts de collecte et de séparation trop élevés par rapport aux bénéfices qui peuvent en être attendus ;

■ Par ailleurs, sans être une spécificité du recyclage, la **levée de fonds** reste souvent **ardue** pour les porteurs de projets innovants. Les institutions financières, notamment, attendent souvent une rentabilité des projets à court-moyen termes, incompatible avec la temporalité à long terme de l'innovation dans le domaine du recyclage. Devant l'absence d'appui financier, certaines entreprises françaises comme Terra Nova se sont ainsi tournées vers des investisseurs étrangers.

Un déficit de compétences

Le recyclage des métaux critiques requiert également un **niveau de technicité élevé**, qui nécessite des compétences spécialisées. En France, l'enjeu à l'horizon 2020 est de développer une offre de formation à la mesure du potentiel que représente le recyclage des métaux critiques. Une étude de faisabilité produite dans le cadre de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques soulignait en 2014 l'insuffisance de l'offre actuelle²⁰. Il n'y aurait notamment aucune formation dédiée au sujet des terres rares.

Les enjeux réglementaires

Des réglementations incitatives

Au niveau européen, le recyclage des métaux critiques s'inscrit dans des démarches plus larges de

18 – PNUE, 2011 : *Recycling Rates of Metals*

19 – Entretien avec M. MENAD, chef de projet recyclage des déchets industriels au sein du BRGM, cité dans *matEnvironnement*, 03/09/2014 : « Métaux stratégiques : les industriels cherchent le bon filon »

20 – Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, étude présentée par M. Patrick HETZEL, député, et Mme Delphine BATAILLE, sénatrice : *Étude de faisabilité de la saisine sur « les enjeux stratégiques des terres rares »*. Transmission à la Commission des Affaires économiques du Sénat le 24/02/2014

promotion de l'économie circulaire, leviers essentiels pour développer les pratiques de recyclage. Les objectifs fixés pour les pays membres au sein de la Directive Cadre 2008/98/CE ont été revus à la hausse en 2014. Ils visent aujourd'hui un recyclage de 70 % des déchets municipaux d'ici à 2030, tout en interdisant la mise en décharge des déchets recyclables d'ici 2025.

La **Directive DEEE** encadre le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques²¹. Prenant effet à partir de 2018, sa révision en 2012 a permis d'ouvrir son champ d'application à l'ensemble des EEE, à quelques exceptions près. Ces mesures réglementaires vont ainsi étendre la collecte et amplifier le gisement de matières premières.

L'enjeu de fixer des objectifs dédiés aux métaux critiques

Malgré son ambition, la réglementation actuelle n'aménage pas une **place spécifique pour le recyclage des métaux critiques**. Son effet réel risque d'être réduit, car les objectifs de recyclage peuvent être atteints sans les métaux critiques, qui représentent une part infime des volumes des DEE ou des véhicules hors d'usage (VHU). En particulier, aucun objectif de collecte / traitement des métaux critiques n'est fixé, une mesure appelée pourtant par un certain nombre d'observateurs au niveau national²². Cette situation peut notamment être expliquée par la difficulté de l'exercice, dans la mesure où ces objectifs devraient être adaptés à chacun des métaux selon les priorités du législateur pour être réellement pertinents²³.

21 – Cette Directive a été transposée dans le droit français à travers le décret du 22 août 2014

22 – En 2010, l'ADEME appelait de tels objectifs dans un rapport dédié aux métaux rares. ADEME, 2010 : *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*

23 – Cette difficulté était soulignée par le Panel international des ressources (UNEP) sur le site de l'UNEP dans un communiqué remontant à avril 2013

Analyse AFOM

ATOUTS

La présence sur le territoire d'unités de recyclage des métaux critiques

Des entreprises de premier plan au niveau mondial

Un tissu de R&D public et privé innovant

FAIBLESSES

Des filières de collecte dans l'ensemble peu structurées et peu rentables

Des usines non adaptées pour le traitement de produits à la composition complexe

Une absence de réglementation spécifique pour les métaux critiques permettant de tirer le marché de leur recyclage

Des porteurs de projets innovants qui rencontrent des difficultés pour la levée de fonds

OPPORTUNITÉS

Une dépendance de plus en plus importante de nombreux pays développés, y compris la France, vis-à-vis des pays exportateurs de métaux critiques

Un gisement de déchets croissant, concernant en particulier les DEEE

Des démarches de soutien au recyclage au niveau international et national

MENACES

Des verrous techniques difficiles à lever au niveau de la collecte et de la séparation des métaux critiques

Un déficit de compétences qui pourrait s'accroître

Une concurrence de certains pays comme les États-Unis et le Japon

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics

Le principal enjeu est de soutenir la **structuration de filières du recyclage au niveau national et européen**. Cela implique notamment les actions suivantes :

- Porter au niveau européen une stratégie de recyclage des métaux critiques, avec des objectifs adaptés à chacun d'entre eux ;
- Inciter financièrement le recyclage de certains métaux critiques quand celui-ci n'est pas rentable pour les entreprises ;
- Renforcer le soutien financier aux projets de R&D pour faciliter notamment la commercialisation de solutions industrielles.

Aux entreprises

- Mettre en œuvre des collaborations intégrant les différents maillons de la chaîne du recyclage (collecte et traitement) ;
- Engager une réflexion coût / bénéfice pour identifier les métaux à haut potentiel de marché au niveau français et mondial.

Aux académiques

- Développer des formations dédiées au recyclage des métaux critiques à destination des entreprises.

Acteurs clés

Au niveau mondial, la France se situe aux avant-postes pour le recyclage des métaux critiques. Quelques grands groupes mènent des projets de R&D prometteurs, certains d'entre eux ayant déjà développé des solutions à une échelle industrielle. Un vivier de PME et start-up conduisent également des projets innovants, en particulier dans le nord de la France.

- Grands groupes : Rhodia, Solvay, Recylex, Eramet, mais aussi des usines détenues par des groupes étrangers comme Nyrstar à Aubry, etc. ;
- PME : Recytech, Baudalet Environnement, Terra Nova, Neo Eco, etc. ;
- Start-up : Verseau, Recupyl, NIREATM, etc.

La recherche technologique est également portée par plusieurs structures telles que les pôles de compétitivité Team², Elastopôle, AXELERA et Matériaux, le CEA, les instituts Carnot ISIFoR et Ingénierie@Lyon ou encore le BRGM, qui participe à plusieurs projets comme Valoplus²⁴ ou Enviree²⁵. Créé en 2013, l'IRT-M2P²⁶ a

lui pour objectif de développer des équipements semi-industriels pour la métallurgie et le traitement des matériaux (tri des matières, analyse du cycle de vie, etc.).

Par ailleurs, la filière est soutenue par les pouvoirs publics à travers plusieurs démarches comme :

- La création d'un Comité des métaux stratégiques, créé en janvier 2011 avec pour objectif d'étudier la vulnérabilité des entreprises face à la raréfaction des matériaux ;
- L'introduction du recyclage dans le programme de la Nouvelle France Industrielle (solution industrielle du quotidien « Nouvelles ressources ») en 2015 et dans les 7 ambitions à fort potentiel pour l'économie française en 2013²⁷ ;
- Des appels à projets. Lancée en 2015, la troisième édition de l'appel à projets de recherche « Production durable de matières premières en Europe », porté par l'ADEME et les membres du réseau européen ERA-MIN²⁸, porte spécifiquement sur le recyclage des métaux critiques.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

24 – Récupération des terres rares dans les lampes basse consommation.

25 – Traitement des déchets miniers et industriels.

26 – Institut de Recherche Technologique « Métallurgie, Matériaux et Procédés ».

27 – Des projets innovants dans le domaine du recyclage des métaux ont été subventionnés à hauteur de 200 000 euros chacun. Ce subventionnement s'inscrit dans le cadre du Programme d'Investissements d'avenir, et plus particulièrement du concours mondial d'innovation.

28 – Réseau européen d'agences de financement de projets de recherche sur les matières premières non énergétiques, de l'extraction des matières premières vierges au recyclage.

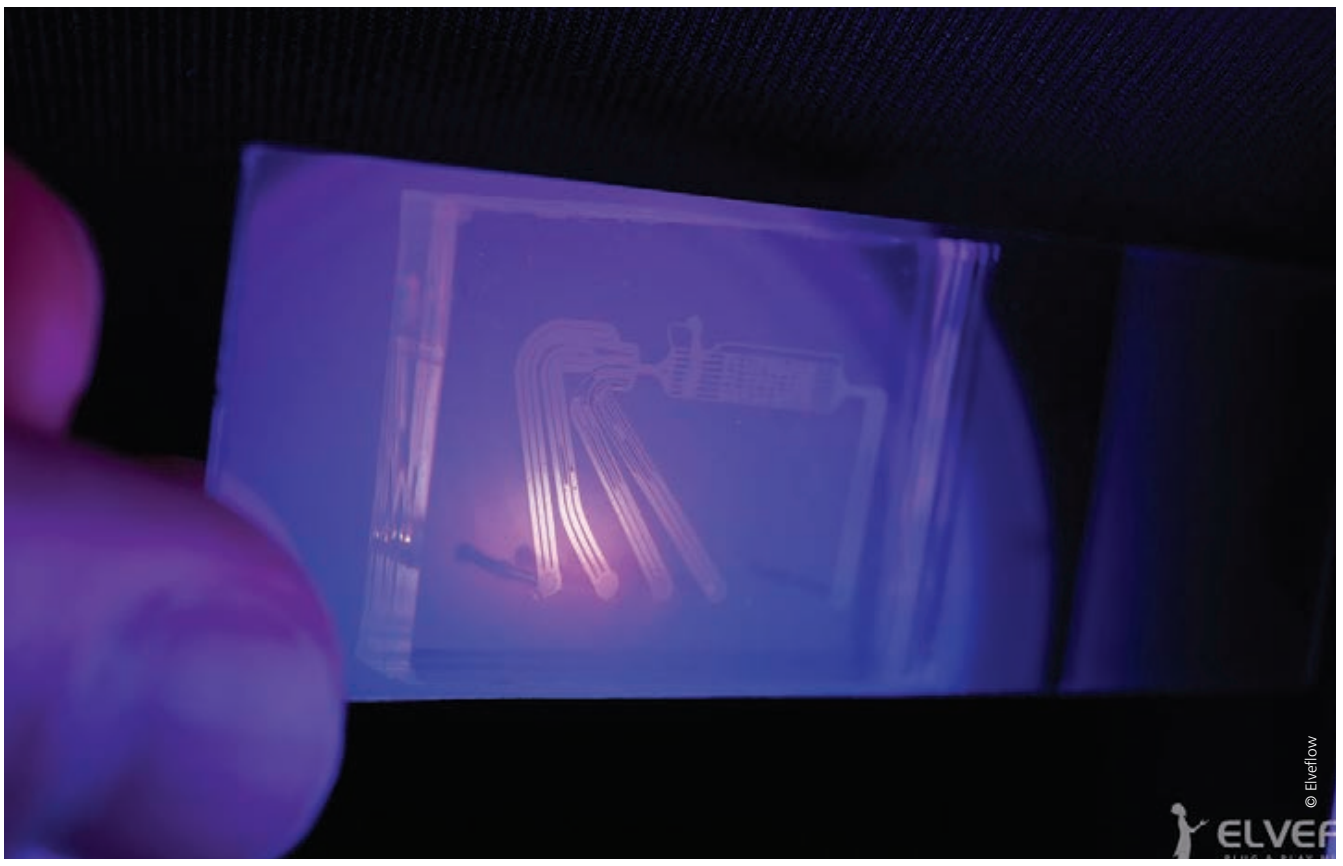
17 Microfluidique

Loisirs & Culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT , Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE , Sécurité
ALIMENTATION

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Fluides – échelle micrométrique/
nanométrique – microsystèmes
– capillaires – microréacteurs



Définition et périmètre

La microfluidique est l'ensemble de technologies permettant la manipulation et la caractérisation de fluides à des échelles micrométriques ou nanométriques. Elle peut être considérée à la fois comme une science visant à l'étude du comportement des fluides à l'intérieur de ces micro-canaux, et une technologie permettant la fabrication et l'utilisation de dispositifs microfluidiques. Ces dispositifs sont constitués d'une surface plane sur laquelle des capillaires et des chambres de réactions sont formés par photolithographie, moulage ou emboutissage. Des liquides en volumes micrométriques ou nanométriques sont ensuite insérés dans ces capillaires où ils sont déplacés, fractionnés, séparés ou mélangés pour obtenir des réactions chimiques. L'intérêt de travailler avec des volumes micrométriques, outre l'économie de moyens utilisés, réside dans l'accélération et l'automatisation du processus.

La microfluidique présente un intérêt en recherche fondamentale : elle permet d'analyser rapidement et précisément des phénomènes prenant naissance dans des systèmes fluides à échelle micrométrique, par exemple à travers le contrôle de l'environnement chimique d'une cellule et la mesure précise de sa réponse à des stimulations.

La microfluidique trouve aussi des applications industrielles dans divers domaines. En premier lieu, les appareils à technologie microfluidique sont utilisés dans les secteurs de l'impression, l'aérospatial, la chimie, les biotechnologies, la physique, l'agroalimentaire et l'environnement. En second lieu, les puces et réacteurs microfluidiques trouvent des applications principalement dans les secteurs de la chimie (en R&D et production industrielle) et des biotechnologies (surtout en recherche académique), et de façon plus émergente de la santé, de l'environnement, du contrôle en agroalimentaire et de l'énergie. Les puces et réacteurs microfluidiques peuvent être simples ou instrumentés (électrodes, capteurs, optiques, pompes...), la tendance étant à la complexification des outils, intégrant de plus en plus d'instruments sans pour autant être accompagnée d'une augmentation du prix.

En chimie, la microfluidique permet d'améliorer la productivité de la R&D, en accélérant les processus de criblage et de caractérisation de molécules, et ouvre de nouvelles perspectives : réduction des transports de matière, réduction des quantités stockées, conditions

réactionnelles inaccessibles aux réacteurs macroscopiques, notamment en chimie supercritique où la microfluidique facilite la manipulation de réactifs dangereux et le contrôle des réactions. Les industriels peuvent ainsi concevoir des puces microfluidiques, par exemple des générateurs de gouttes, en céramique, en polymères, etc., qui leur permettent de tester en grand nombre et très rapidement des formulations de produits pour sélectionner les meilleurs candidats à la R&D.

En biotechnologies, la microfluidique intervient dans divers procédés, tels que le criblage à haut débit, l'électrophorèse d'ADN ou de protéines, la PCR, le tri cellulaire, les tests enzymatiques... Plus spécifiquement, dans le domaine biomédical, la microfluidique s'applique aux analyses sanguines, à la conception de tests de diagnostic *in vitro* et de diagnostic rapide avec des laboratoires sur puces, ou à des systèmes améliorés d'administration des médicaments. Des recherches sont également menées pour concevoir des diagnostics à bas coût sur papier, ou des organes sur puce à des fins de simulation.

Dans le domaine du contrôle agroalimentaire, la microfluidique permet une analyse ultra-rapide des produits avant consommation. Elle facilite la détection de contaminants chimiques ou biologiques, d'allergènes...

La microfluidique trouve également des applications dans le domaine de l'environnement, par exemple pour les mesures atmosphériques, la détection de polluants dans l'eau ou de contaminants dans les sols¹ ; le marché de l'analyse de l'eau reste toutefois le plus adapté aux caractéristiques de la microfluidique. Des explorations sont également en cours sur la conversion de gaz à effet de serre, la synthèse de polymère ou des techniques de dessalement de l'eau à bas coût.

Dans le domaine de l'énergie, la microfluidique joue un rôle dans la production de l'énergie, grâce à ses propriétés de conduction de la chaleur ainsi que les effets électrocinétiques. Elle ouvre notamment des voies vers des sources d'énergie propres, comme par exemple les micropiles à combustible pour la téléphonie et l'électronique mobile, source de puissance compacte, longue durée et portable.

Finalement, en sécurité civile et défense, la microfluidique permet des analyses rapides, par exemple pour

1 – Cf. Fiche « Traitement des sols pollués »

l'identification de l'ADN d'un suspect. La miniaturisation des procédés de détection biologique et chimique permettra des applications de type dosimètre individuel ou détecteur portable de terrain.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La microfluidique est une technologie d'intérêt pour la recherche fondamentale, de par sa capacité à accélérer et améliorer les processus tout en économisant les moyens. C'est également une source d'innovation pour des domaines industriels très nombreux et très variés : industries biomédicales, agroalimentaire, énergies propres, gestion de l'eau et de l'environnement, biodéfense et sécurité, cosmétique, etc. Environ 600 utilisateurs industriels et 200 start-up sont déjà positionnés sur ce marché dans le monde². Elle représente pour la biologie et la chimie une révolution semblable à celle apportée par les microprocesseurs à l'électronique et l'informatique. La microfluidique a la capacité de modifier en profondeur les techniques actuelles dans ces domaines, tout en permettant une réduction dramatique des coûts ainsi que des risques liés à la manipulation de fluides en plus grands volumes, et en remplaçant les équipements encombrants par des puces et microréacteurs plus maniables et exigeant moins de mesures de sécurité. Elle permet donc de travailler plus vite et de façon moins coûteuse, dans un environnement plus propre et plus sûr.

Elle est nécessaire pour amener en clinique la «révolution génomique », la médecine de précision basée sur un séquençage rapide et peu coûteux, qui représente un des plus grands champs d'avancées potentielles des prochaines années. Elle est également la seule technologie à même d'intégrer une dimension chimique et biologique dans le monde des objets connectés. Enfin, elle est au centre de marchés très dynamiques et porteurs sur les prochaines années, tels que le biomédical, la sécurité alimentaire, la cosmétique ou encore la chimie.

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Capteurs** : les capteurs, en tant que microsystèmes intégrés pour la détection de marqueurs, sont une application directe de la microfluidique ;

■ **Ingénierie génomique et métaomique** : la microfluidique est un outil d'instrumentation pour les technologies de l'ingénierie génomique et de la métaomique, permettant notamment de manipuler des cellules uniques et intervenant dans le séquençage de l'ADN ;

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique** : les technologies de modélisation et de simulation permettent de faciliter la conception des laboratoires sur puce, par exemple en modélisant la physique des fluides à échelle micrométrique ;

■ **Procédés relatifs à la chimie verte** : la microfluidique, permettant de manipuler des fluides à échelle micrométrique, est un outil puissant pour les procédés de chimie verte ;

■ **Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition** : la microfluidique est un outil notamment de modélisation, permettant d'étudier l'impact de probiotiques sur un environnement, par exemple en reproduisant un microbiote gastrointestinal sur un laboratoire sur puce ;

■ **Valorisation et intelligence des données massives** : la microfluidique permet de réaliser des tests sur des milliers d'échantillons, générant ainsi des quantités massives de données que ces technologies aident à traiter et interpréter.

Les marchés

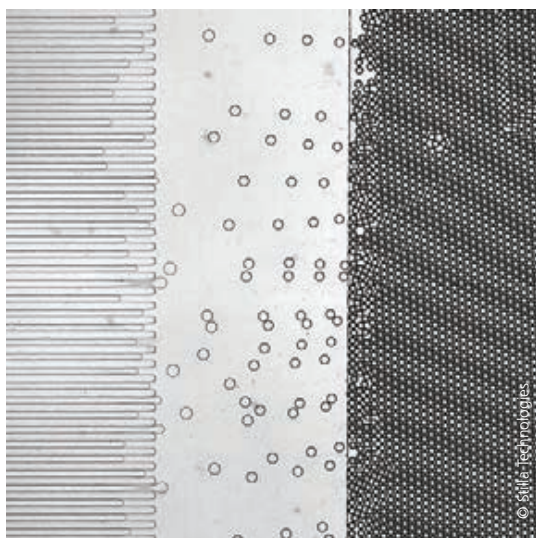
Le marché global de la microfluidique est estimé à plus d'une dizaine de Mds de dollars en 2013, et est très dynamique³. Il recouvre de nombreux marchés applicatifs, dont certains sont matures (impression à jet d'encre...) et d'autres plus émergents (Lab-on-chip, applications biomédicales ou agroalimentaires...)

Aujourd'hui, les impressions à jet d'encre sont l'application la plus courante de la microfluidique. Ce marché est surtout constitué du segment des têtes d'imprimantes à jet d'encre, segment très important en volume mais mature, et dont la croissance est faible. La part relative des impressions à jet d'encre dans le marché total de la microfluidique devrait diminuer significativement d'ici 2020.

Le second marché applicatif de la microfluidique est le marché du biomédical, estimé à 1.6 Mds de dollars en 2013, avec une croissance moyenne

2 – Données de Institut Pierre Gilles de Gennes

3 – Données de Institut Pierre Gilles de Gennes, BCC Research, Conférence Micro-TAS 2014



de 17 %⁴. Il couvre à la fois le renouvellement des systèmes d'analyse centralisés, et le développement de nouveaux systèmes (diagnostic, suivi à domicile, aide à la personne, délivrance de médicaments). La croissance devrait se maintenir au-delà de 20 % à horizon 2025, la pression croissante sur les dépenses de santé étant une des clés du développement de ce secteur. Les principaux acteurs du diagnostic ou de l'analytique sont positionnés sur ce marché : Siemens, Philips, General Electric Healthcare, Johnson & Johnson, Hitachi, Abbott, et quelques acteurs de taille moyenne français, tels que BioMérieux et Bio-Rad. Quelques PME françaises sont également positionnées, telles que HiFiBio, Cytoo, Millidrop, Stilla Technologies...

Une dynamique comparable s'observe dans les domaines de la sécurité (police, domaine militaire, sécurité alimentaire, environnement) et du monitoring (suivi en ligne de procédés), bien que les volumes de ces marchés soient plus modestes.

Le marché de la production chimique à haute valeur ajoutée, important pour l'industrie chimique, la cosmétique et la pharmacie, devrait se développer. La microfluidique répond en effet à des besoins des acteurs industriels en termes d'augmentation du rendement des procédés de production chimique, ainsi que de rapidité et de précision des analyses et des suivis de réactions.

4 – Données de BCC Research

Enfin, de nombreuses applications destinées au grand public devraient se développer, à horizon 2020/2025, en couplage avec le développement d'objets connectés utilisés quotidiennement, à commencer par le *smartphone*: analyse en temps réel des composants de la nourriture, détection des contaminations bactériennes, analyse des paramètres physiologiques au cours d'activités physiques, etc.

Les défis technologiques à relever

Malgré les progrès rapides accomplis dans le domaine de la microfluidique, quelques barrières freinent encore son développement. Les procédés de photolithographie, s'ils sont de plus en plus précis, restent un verrou de développement de cette technologie en termes de précision du réseau de capillaires et chambres de réaction. D'autre part, la compréhension des phénomènes survenant à l'échelle micrométrique n'est pas encore complète, notamment en ce qui concerne la maîtrise des changements de phase des fluides, ainsi que des réactions et phénomènes physiques et biochimiques. En outre, les technologies et les protocoles d'intégration d'échelle, permettant de passer d'un échantillon généralement de l'ordre du millilitre, à un échantillon pour dispositif microfluidique de l'ordre du microlitre voire du nanolitre, doivent être développées. L'échantillon doit en effet être conditionné pour être manipulable à cette échelle, et les effets de concentration anticipés. Enfin, les lab-on-chip développés aujourd'hui, s'ils sont miniaturisés, nécessitent des périphériques parfois encombrant (carte électronique, pompes etc...). Un effort de miniaturisation doit nécessairement porter sur ces périphériques pour obtenir des systèmes opérationnels basés sur les technologies microfluidiques.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

La microfluidique est une technologie prometteuse qui renferme de multiples possibilités d'applications. Cependant, son coût et sa complexité d'utilisation restent un frein à sa diffusion massive dans les secteurs industriels. Son avenir réside à la fois dans la diversité des solutions développées, et dans son accessibilité à un coût plus bas. L'enjeu primordial du développement de cette technologie est dans la conception et la commercialisation de solutions plus simples et moins coûteuses, afin de faciliter sa diffusion.

Les enjeux réglementaires

Les principaux enjeux réglementaires liés à la microfluidique concernent leurs applications dans le secteur médical. En effet, la réglementation européenne et française concernant les dispositifs médicaux évolue, et les équipementiers du dispositif médical devront s'adapter à cette évolution. Par ailleurs, à plus long terme, le couplage de la microfluidique avec des objets connectés soulèvera des questions réglementaires liées au secret médical.

En outre, les procédures nationales d'accréditation des dispositifs microfluidiques pour analyses, intégrant les problématiques d'échelle des échantillons et de seuils réglementaires, sont très lentes, particulièrement pour les dispositifs médicaux dans le domaine de la santé et dans le secteur de l'environnement. Elles constituent un handicap pour une technologie de rupture qui se développe rapidement.

Analyse AFOM

ATOUTS

Une recherche académique d'excellent niveau

Une dynamique de création de start-up

Des secteurs applicatifs sur lesquels la France est bien positionnée (chimie, santé, agroalimentaire)

FAIBLESSES

Un tissu industriel en fabrication de dispositifs microfluidiques manquant de « poids lourds », le secteur étant assez dépendant de la recherche publique

OPPORTUNITÉS

Un potentiel applicatif très important et un domaine riche d'innovations

Des synergies possibles avec les objets connectés, les biocapteurs, les logiciels...

Une pression croissante sur les dépenses de santé

MENACES

Dynamisme de la concurrence étrangère, surtout aux États-Unis et en Asie

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

- Miser sur des matériaux, procédés et technologies favorisant l'interopérabilité, afin de permettre la diffusion de cette technologie à échelle industrielle ;
- Ajuster le ciblage de l'échelle du marché et se concentrer sur des produits à très haute valeur ajoutée apportant une vraie performance aux procédés ;
- Chercher des débouchés à l'étranger, notamment dans les marchés américains et asiatiques qui

sont très dynamiques, mais également les marchés des pays en développement sur des dispositifs à bas coût (diagnostic *in situ* sur papier).

Concernant les pouvoirs publics :

- Soutenir le développement d'infrastructures de production multimodales intégrant électronique, matériaux et biochimie ;
- Renforcer les programmes de formation continue pour développer les compétences humaines dans le domaine de la microfluidique.

Acteurs clés :

Organismes de recherche et de formation

Plusieurs laboratoires spécialisés dans la microfluidique existent au sein d'organismes de recherche et de formation à travers la France, comme par exemple le **laboratoire Microfluidique, MEMS, Nanostructures (MMN)** de l'Institut Pasteur, le complexe scientifique **MINATEC** à Grenoble et le laboratoire **Leti du CEA**, ou **l'Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN)** à Lille. Par ailleurs, l'**IDEX /LABEX Institut Pierre Gilles de Gennes** pour la Microfluidique regroupe 14 équipes de recherche affiliées à ses fondateurs : **Chimie Paris Tech**, **l'Institut Curie**, **l'École Nationale Supérieure (ENS)**, **l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles (ESPCI)**.

Start-up et PME

De nombreuses start-up et PME proposent des produits et services en microfluidique. Certaines sont positionnées sur l'instrumentation, telles que **Fluigent**, **Elvesys**, **Klearia**, **CG-Tec**, **Raindance Technologies**, ou sur la microencapsulation, telles que

Capsum. D'autres proposent des services d'analyse de microenvironnements telles qu'**Alvéole**, des modèles cellulaires par exemple pour la découverte de médicaments, comme **Cytoo**, du criblage à ultra haut-débit s'appuyant sur une excellence en microfluidique comme **HiFiBio**, ou des solutions de diagnostic comme **Millidrop** ou **Stilla Technologies**.

Grands groupes

Si la France ne compte pas de grands groupes positionnés en instrumentation pour la microfluidique, plusieurs grands groupes français maîtrisent l'utilisation et soutiennent le développement de ces technologies dans différents secteurs, par exemple en santé (**bioMérieux**, **Sanofi**⁵), ou en chimie (**Laboratory of the Future de Solvay**).

Écosystème de l'innovation

Les acteurs français de la microfluidique sont soutenus par diverses structures, parmi lesquels des pôles de compétitivité (par exemple **Medicen**), des IRT (par exemple **Bioaster** sur l'infectiologie et la microbiologie), des instituts Carnot (comme le **Carnot LAAS** à Toulouse), ou encore **l'IFP Énergies Nouvelles**.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

5 – A travers une convention de mécénat signée en 2014 entre Sanofi et l'ESPCI.

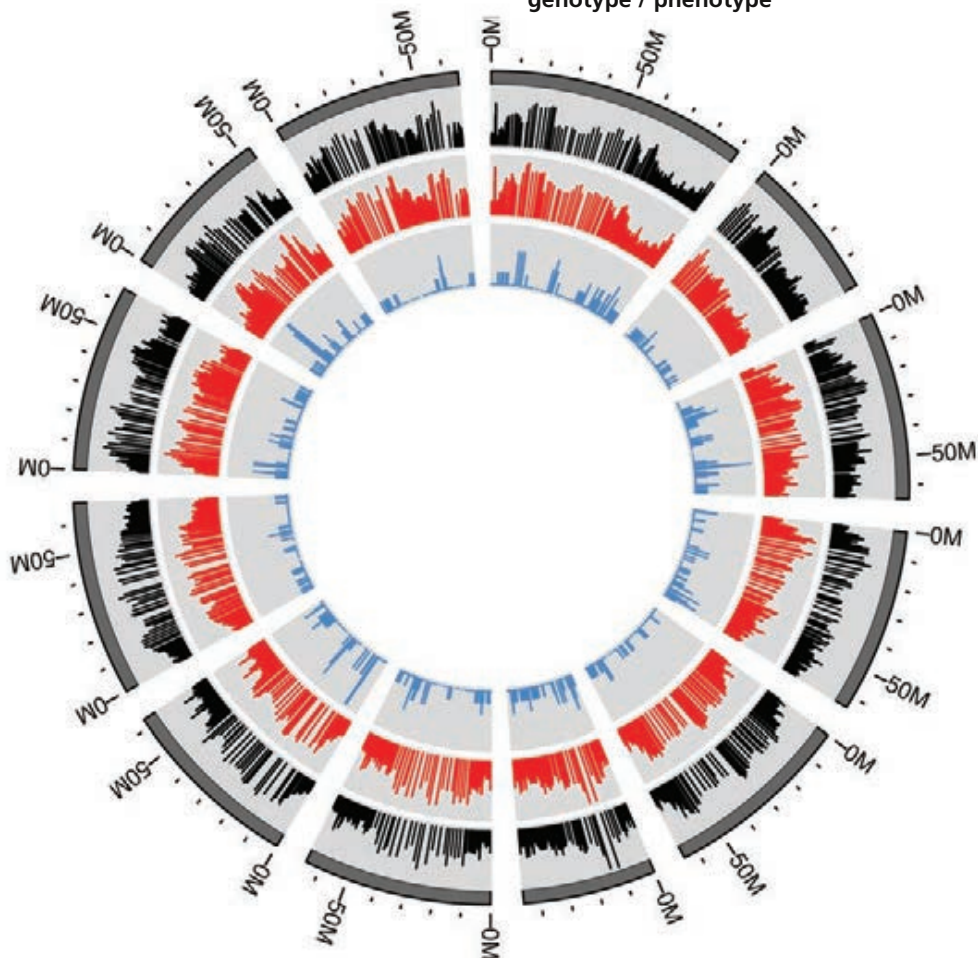
18 Métaomique

Loisirs & Culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT , Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE , Sécurité
ALIMENTATION

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Biomarqueurs – expression
génique – métabolismes – lien
génotype / phénotype



Définition et périmètre

La métaomique regroupe des technologies permettant d'appréhender dans leur globalité des systèmes biologiques complexes et dynamiques. Elle permet d'étudier en quantités massives des données, telles qu'un ensemble de gènes (génomique¹), d'ARN (transcriptomique), de protéines (protéomique²), de métabolites (métabolomique). La génomique, la transcriptomique et la protéomique permettent de caractériser l'expression du patrimoine génétique; la métabolomique complète l'analyse fonctionnelle, à travers l'identification et la quantification simultanées de milliers de métabolites (acides aminés, sucres, acides gras...) présents dans un échantillon biologique. L'effet de perturbations physiologiques, toxicologiques, génétiques ou nutritionnelles peut ainsi être analysé à travers l'étude des métabolites, soit parce qu'ils présentent un intérêt intrinsèque, soit parce qu'ils sont le reflet d'une activité biologique d'intérêt. Ils sont alors utilisés comme biomarqueurs : biomarqueurs de dépistage, biomarqueurs prédictifs d'efficacité, biomarqueurs de diagnostic... L'identification de biomarqueurs précoces permet d'intégrer une dimension prédictive sur les effets d'une perturbation à long terme.

La métabolomique est la technologie la plus récente parmi celles de la métaomique et la plus porteuse d'innovation. Elle permet une analyse plus poussée de l'expression des gènes et des interactions entre génome et environnement. Les principales techniques utilisées par la métabolomique sont la chromatographie liquide haute performance, la chromatographie en phase gazeuse et l'électrophorèse capillaire (méthodes de séparation), couplées à la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire ou la spectrométrie de masse (méthodes de détection). La tendance est à une investigation des données obtenues à plusieurs niveaux d'une cellule : cellule dans son ensemble, différents métabolites, fluides... et à l'intégration de ces données, de manière à appréhender les liens entre génotypes et phénotypes, ainsi que d'approfondir les interactions entre gènes et environnement.

Le principal champ d'application de la métaomique est la santé, en particulier la découverte de biomarqueurs (pour diagnostiquer et évaluer la progression

des maladies), la découverte de médicaments (études de toxicologie, études précliniques, études pharmacocinétiques), et le diagnostic moléculaire. Les aires thérapeutiques les plus explorées jusqu'à présent sont celles qui correspondent à des ensembles complexes et dynamiques : l'oncologie, qui constitue le segment le plus important, suivie par les dysfonctionnements du système nerveux central et les troubles du système cardiovasculaire. A plus long terme, la métaomique ouvre la voie vers la médecine personnalisée, c'est-à-dire le choix d'un traitement particulier pour chaque patient en fonction de ses spécificités génétiques et environnementales, voire de la médecine prédictive.

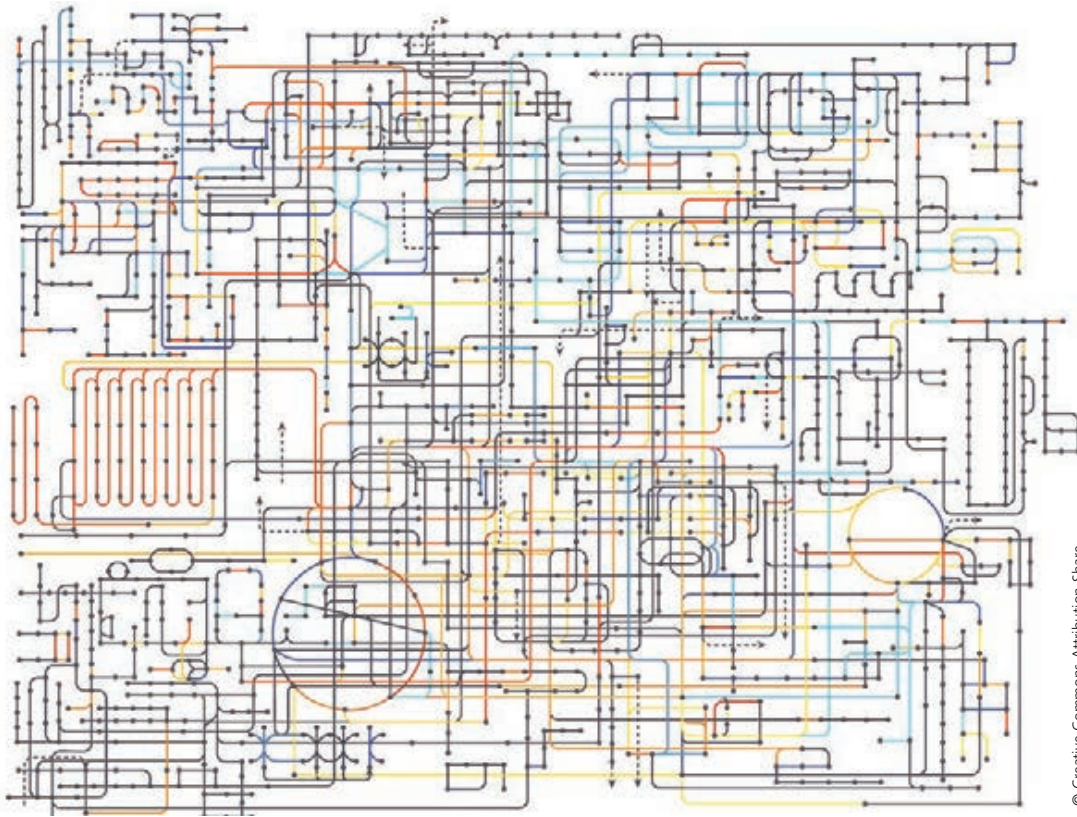
La métaomique trouve également des applications dans d'autres secteurs, notamment l'alimentation (épidémiologie nutritionnelle, nutrigenomique, sécurité alimentaire ou amélioration variétale des végétaux) et l'environnement (analyse de milieux complexes).

Dans le secteur de l'alimentation, la métaomique permet des approches d'épidémiologie nutritionnelle, soit la caractérisation des consommations alimentaires individuelles. Les nouveaux outils fournis par la métaomique visent à évaluer la réponse métabolique aux régimes alimentaires, c'est-à-dire en nutrigenomique les interactions entre gènes et nutriments. Grâce à un phénotypage des métabolites de nutriments et micro-constituants après digestion, les interactions entre génotype, alimentation et métabolisme sont étudiées et mises en relation avec la prévention des maladies métaboliques ou chroniques (obésité, diabète, maladies cardiovasculaires, cancers...). Dans le domaine de la sécurité alimentaire, la métabolomique a été utilisée par exemple pour rendre compte de la qualité et de la valeur nutritive des aliments ou pour détecter l'exposition des aliments à un contaminant. À plus long terme, la métaomique ouvre les portes vers la biologie prédictive, et pourrait ainsi permettre de prédire l'évolution bactériologique des aliments et renforcer les dispositifs de sécurité alimentaire.

La métabolomique est également un outil pour analyser les perturbations des espèces végétales, issues de stress biotique ou abiotique ou de la présence de contaminants, en complément des analyses génomiques ou protéomiques. Elle permet ainsi d'évaluer la diversité dans les variétés végétales et d'analyser le comportement des variétés dans leur environnement, ou leur réaction à tel ou tel produit, et même de sélectionner des traits de résistance aux différents stress pour accélérer les processus d'améliorations variétales.

1 – Cf. fiche « Ingénierie génomique »

2 – Cf. Fiche « Protéomique », Rapport Technologies Clés 2010, DGE



© Creative Commons Attribution-Share

Enfin, dans le secteur de l'environnement, la métabolomique est une approche puissante pour découvrir des profils de biomarqueurs indiquant des réponses biologiques qui résultent d'expositions à des toxiques environnementaux. Elle peut ainsi rechercher au sein de tous les compartiments environnementaux (eau, sol, atmosphère) des marqueurs reflétant les modifications des conditions d'exposition, en lien avec les évolutions climatiques ou sociétales. Elle permet également d'identifier de nouvelles souches bactériennes, ou de suggérer des pistes pour identifier les voies métaboliques impliquées dans ces réponses, voire déterminer les mécanismes de toxicité de certaines molécules.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La métabolomique, et principalement la métabolomique, est porteuse d'innovation dans tous les domaines des sciences du vivant. Elle permet une vision globale, simultanée et dynamique des phénomènes survenant au sein d'une cellule, d'un organisme ou d'un métabolisme, et ainsi d'élargir le prisme d'observation, tout

en intégrant les interactions entre le génome et l'environnement. L'impact sur l'étude de phénomènes intervenant dans des systèmes complexes, en particulier les milieux comme l'air, le sol ou l'eau, ou sur des maladies multifactorielles, comme l'obésité ou le diabète Type 2, est substantiel. En outre, la métabolomique introduit une dimension prédictive dans les diagnostics à travers l'identification de marqueurs précoces, et ouvre la voie vers une médecine non plus seulement curative mais également prédictive.

Enfin, la métabolomique s'applique à des domaines aux enjeux très importants : santé et découverte de nouveaux traitements médicaux, alimentation et améliorations d'espèces et variétés agricoles, environnement et préservation de la biodiversité...

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Ingénierie génomique** : le séquençage d'ADN est un des outils de base de la génomique, l'un des piliers de la métabolomique ;

■ **Microfluidique** : la microfluidique est un outil utilisé en instrumentation dans les différentes technologies de la métabolomique, notamment le séquençage génétique ;

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique** : ces technologies sont un outil puissant pour évaluer le comportement de métabolites dans un environnement complexe, donc par exemple la pertinence de biomarqueurs ;

■ **Procédés relatifs à la chimie verte** : la métabolomique fournit des méthodes d'analyse des caractéristiques et du comportement de différentes cellules, molécules et microorganismes intervenant dans la chimie verte ;

■ **Solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux** : les technologies de la métabolomique permettent d'étudier les mécanismes de défense et de croissance des plantes, ainsi que l'impact de l'environnement sur ceux-ci, et également d'identifier les molécules ou organismes stimulateurs ;

■ **Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition** : la sélection et le développement de souches de probiotiques fait intervenir des technologies de métabolomique afin d'étudier les caractéristiques, la croissance et le comportement de microorganismes et de cellules dans des environnements complexes ;

■ **Valorisation et intelligence des données massives** : la métabolomique génère des données en très grande quantité, que les technologies de valorisation et d'intelligence des données massives permettent de traiter et d'interpréter.

Les marchés

Le marché global de la métabolomique recouvre toutes les applications des diverses technologies qu'elle renferme (génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique). Il s'agit d'un marché émergent bien qu'en croissance.

Le marché de la métabolomique, incluant les instruments et équipements de bioanalyse, les applications de la métabolomique et les outils bioinformatiques, est estimé à 712 millions de dollars en 2012 et un chiffre d'affaires d'1,4 milliard de dollars est attendu en 2017³. Les acteurs de la métabolomique sont des

équipementiers tels qu'Agilent, Bruker, Thermo Fisher ou Shimadzu; l'analyse métabolomique est dominée par des leaders comme Metabolon, Biocrates Life Sciences, Metanomics Health et HMT, et des compagnies de bioinformatique telles qu'Accelrys, Chenomx, HighChem ou nonlinear. Ces grands acteurs sont bien ancrés dans le marché, et peu de nouveaux entrants de même taille sont attendus dans les prochaines années, bien que quelques PME aient réussi à se positionner. La croissance de ce marché se fait donc surtout par le développement de nouvelles lignes de produits basés sur la métabolomique, et un nombre croissant de collaborations entre académiques et industriels (Metabohub...).

Concernant les marchés d'application, le marché global des biomarqueurs était de l'ordre de 15 milliards de dollars en 2012, et devrait atteindre environ 40 milliards de dollars à horizon 2020⁴. C'est un marché qui connaît une croissance soutenue, poussé notamment par une demande importante en diagnostics compagnons ; la métabolomique, incluant génomique, transcriptomique, protéomique et métabolomique, constitue le segment le plus important de ce marché, et les avancées technologiques dans ces domaines sont un moteur essentiel de sa croissance.

Les défis technologiques à relever

La métabolomique suppose des analyses à grande échelle, nécessitant des capacités technologiques variées et une expertise transdisciplinaire, pour l'analyse d'un grand nombre d'échantillons et la prise en charge du grand nombre de données générées. De nombreux outils analytiques sont nécessaires, dont certains sont coûteux et complexes à utiliser, ce qui représente un défi supplémentaire.

Concernant plus spécifiquement la métabolomique, le principal facteur limitant son développement est l'identification des métabolites. Actuellement, seuls 15 à 20 % des signaux détectés sont annotés et les métabolites correspondants identifiés par les équipements. Le principal enjeu pour son développement est donc la caractérisation et l'annotation de métabolites ainsi que de leur mécanisme d'action, qui reste en majorité assurée par la recherche académique. Des avancées considérables doivent être faites sur ce front,

3 – Données de BCC Research

4 – Données de BCC Research, MarketsandMarkets, LEEM

les bases de données actuelles de biomarqueurs étant encore très insuffisantes. L'étape suivante consistera en la validation de ces biomarqueurs, qui supposera des tests en grand nombre sur des populations variées pour évaluer leur robustesse et leur pertinence. Cette activité pourrait être assurée par des PME, dans la mesure où elle demande le traitement haut débit de milliers d'échantillons avec des méthodes d'analyse relativement simples. Cela suppose cependant que des kits d'analyse métabolomique simples soient développés par les équipementiers et commercialisés à destination des entreprises. Des compétences d'interprétation des résultats doivent également être mobilisées, le savoir-faire en analyse et traitement des données étant essentiel sur ce marché.

Par ailleurs, le manque de fiabilité et de reproductibilité des résultats sont souvent perçus comme des limites importantes au développement de la métabolomique. Très peu de données publiques sont disponibles ; le grand nombre de données générées par la technologie, ainsi que l'impact de nombreux facteurs, comme la variabilité inter-individus ou les habitudes alimentaires, sur le métabolisme, rendent l'interprétation des résultats très complexe.

Le développement et la standardisation des outils et méthodes d'analyse bioinformatiques, ainsi que la constitution de bases de données qui fait l'objet de plusieurs initiatives (projet européen EURRECA, projet ANR METAPROFILE, projet IbiSA MetabDB), devraient faciliter le traitement et l'interprétation biologique des données enregistrées. En outre, des méthodes permettant de visualiser la distribution spatiale des métabolites, ainsi que de mesurer la dynamique métabolique grâce à la fluxomique⁵, se développent également et pourront apporter de nouveaux éléments d'interprétation.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le premier défi commercial consiste à communiquer autour du potentiel et de la valeur ajoutée de la métabolomique, et à éduquer les futurs utilisateurs au-delà des adopteurs précoces, notamment au sein des industriels. En effet, si la génomique, la transcriptomique et,

dans une moindre mesure, la protéomique sont plus matures, la métabolomique est une technologie émergente, moins populaire et moins acceptée. Les systèmes complexes étudiés faisant intervenir de nombreux facteurs, la reproductibilité des résultats est un défi qui fait augmenter les coûts logistiques d'exploitation de la métabolomique, ce qui est perçu par les industriels comme une barrière, le retour sur investissement n'apparaissant pas toujours clairement. Les industriels font donc face à un enjeu très important de communication sur les succès et l'intérêt de la méthode, afin de développer une demande dynamique.

En second lieu, une offre variée et pertinente sur la métabolomique doit être consolidée, en particulier face à une concurrence très dynamique aux États-Unis et au Japon. Pour cela, plusieurs défis doivent être relevés :

- Disposer d'une bibliothèque de métabolites annotés et validés la plus complète possible, bibliothèque qui peut être centrée sur un type de métabolite donné (lipides, biomarqueurs spécifiques...);
- Anticiper les difficultés liées à la propriété intellectuelle des données générées grâce à la métabolomique. En effet, les industriels et les prestataires de service préfèrent souvent garder un avantage compétitif et ne pas mettre en commun les données ;
- Élargir la gamme de types d'échantillons pouvant être analysés tout en garantissant leur intégrité aux différentes étapes du processus, par exemple grâce au développement de kits de prétraitement ou d'accompagnement à la définition de protocoles expérimentaux ;
- Maintenir la compétitivité de l'offre en termes de méthodes d'analyse (séparation et détection) malgré le coût conséquent des équipements qui constitue une barrière forte pour les PME ;
- Garantir une offre bioinformatique adaptée à la quantité de données générées et permettant d'assurer l'interprétation biologique des résultats.

Les enjeux réglementaires

Le principal enjeu réglementaire pour les domaines d'application de la métabolomique consiste en l'inclusion et la définition légale de la notion de biomarqueurs. Si cette notion est bien acceptée dans le domaine de la santé, elle n'existe pas encore dans la réglementation, ce qui est problématique dans les

5 – La fluxomique est l'étude des flux de fluides et molécules à l'intérieur de cellules.

études toxicologiques et les essais cliniques dans la mesure où les nombreuses données générées n'ont pas toujours de cadre légal. En outre, la notion de biomarqueurs est encore très nouvelle en épidémiologie nutritionnelle ou dans le secteur des analyses environnementales. L'intégration des biomarqueurs dans les réglementations régissant ces domaines aiderait au développement de la métabolomique.

Dans le secteur agroalimentaire, la reconnaissance des allégations santé pour les aliments par l'EFSA est un enjeu majeur. En effet, en l'absence de cette reconnaissance, les industriels agroalimentaires ne peuvent exploiter les résultats des recherches métabolomiques, par exemple pour des aliments visant à prévenir la survenue de maladies métaboliques, comme l'obésité ou le diabète Type 2.

Analyse AFOM

ATOUTS

Force de recherche dynamique et structurée

Acteurs académiques d'envergure internationale

FAIBLESSES

Peu de leaders industriels sur la métabolomique, notamment positionnés sur la métabolomique

OPPORTUNITÉS

Marchés applicatifs très dynamiques (biomarqueurs, sécurité alimentaire)

Technologies permettant de passer de l'analyse d'un type cellulaire à l'étude des interactions entre « individus » dans des systèmes complexes et dynamique, pouvant également regrouper différents types cellulaires

Technologies permettant d'étudier directement les impacts de l'environnement sur l'expression génique et le phénotype

MENACES

Facteur limitant de l'annotation et l'interprétation des données

Lourdeur des coûts pour les petites entreprises

Concurrence des États-Unis et du Japon, notamment sur les biomarqueurs

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

- Réunir une taille critique de compétences permettant d'adresser les différents marchés cibles, ou se positionner sur un marché spécifique avec une offre dédiée intégrant différentes technologies d'analyse ;
- Se positionner sur les nouvelles technologies associées, notamment la fluxomique ou celles permettant d'analyser la distribution spatiale des métabolites ;
- Développer des actions concertées de communication avec l'ensemble des acteurs de la métaomique sur la valeur ajoutée de ces nouvelles technologies, en particulier la métabolomique.

Concernant les pouvoirs publics :

- Privilégier les formations transdisciplinaires pour consolider les compétences humaines et la capacité à exploiter les technologies métaomiques (chimie, biologie, statistiques, bioinformatique, etc.) ;
 - Favoriser une harmonisation, au niveau européen ou international, des standards des -omiques, afin de faciliter le recueil, le traitement, la qualité et le stockage des informations extraites ;
 - Soutenir le développement de plateformes bioinformatiques de référence pour consolider l'expertise sur les analyses métaomiques.
-

Acteurs clés⁶ :

Organismes de recherche

Des compétences françaises de recherche sur la métaomique sont rassemblées aussi bien dans des EPST⁷ tels que le **CNRS**, le **CEA**, l'**INRA**, l'**Inserm**, des EPIC⁸ tels que le **Cirad**, que dans des structures physiques telles que l'**Institut Pasteur** ou le **GénoPole d'Evry**. Concernant plus particulièrement la métabolomique : **Metabohub** est une infrastructure nationale en métabolomique et fluxomique qui fournit des outils de technologies et des services aux organismes de recherche et aux entreprises ; le **Réseau Français de Métabolomique et Fluxomique** (RFMF) œuvre à structurer et fédérer les communautés scientifiques francophones concernées par la métabolomique ; la **Plateforme Mallabar** (Métabolomique Appliquée à L'étude de LA Biodiversité mARine), inaugurée à Marseille début 2015, est destinée à ouvrir de nouvelles voies d'étude des organismes et environnements marins.

Start-ups et PME

Plusieurs start-ups et PME françaises sont positionnées en métaomique : services d'analyse métabolomique (tel que **Phylogene**), génomiques ou protéomiques (tels que **Hybrigenics** et **HiFiBio**), développement et commercialisation de molécules thérapeutiques (tels que **Affichem** et **Metabolys**), découverte de biomarqueurs *via* la protéomique (tel que **Biosystems International**) ou la génomique (tel que **Ipsogen**).

Grands groupes

Les grands groupes français sont absents du segment de l'instrumentation dans les différentes technologies de la métaomique. Cependant, ces technologies sont utilisées et maîtrisées par de grands acteurs français, notamment en santé, comme par exemple **bioMérieux** ou **Sanofi**.

6 – Pour les acteurs clés de la génomique, cf. fiche « Ingénierie génomique »

7 – Établissements Publics à caractère Scientifique et Technologique

8 – Établissements Publics à caractère Industriel et Commercial

Écosystème de l'innovation

Les entreprises de la métaomique sont soutenues par divers pôles de compétitivité, comme par exemple

Alsace BioValley, Medicen, Lyonbiopôle, Céréales Vallée, Axelera, IAR, ainsi que divers instituts Carnot, tels que par exemple **Curie Cancer**.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

**LOISIRS
& CULTURE**Énergie,
Mobilité,
NUMÉRIQUEEnvironnement, Habitat,
Santé et bien-être, Sécurité**ALIMENTATION****► Correspond à
une technologie clé 2015****MOTS CLÉS**Prédictif, préventif, analyse
comportementale, tracking,
signature, systèmes
d'information, Big Data.

Définition et périmètre

L'analyse comportementale fait référence aux traitements logiciels visant à détecter un ou plusieurs scénarii complexes mettant en œuvre une succession d'évènements non corrélés dans le temps et l'espace et issus de capteurs/sondes hétérogènes (physiques ou logiques).

L'analyse comportementale est aujourd'hui matérialisée par une série de briques technologiques qui peuvent être implémentées dans d'autres outils (vidéo, logiciels, etc.) et qui ont pour vocation d'alerter et de prévenir d'une (potentielle) irrégularité d'une action. En effet, il est encore difficile, voire impossible, de déterminer formellement si une action est frauduleuse ou non conforme. L'analyse comportementale est alors capable de fournir un score de fiabilité pour une action ponctuelle – scoring. Le scoring est aujourd'hui de plus en plus utilisé dans les secteurs de la sécurité, des télécommunications et des loisirs & culture.

Au travers d'outils adaptés, on est aujourd'hui en capacité d'analyser la plupart des comportements et notamment les comportements d'achats ou de consultation de publicités. Données quantitatives - temps passé en magasin ou sur un site, taux de conversion - et qualitatives - préférences des consommateurs ou parcours précis dans le magasin - sont autant de données qui représentent des éléments clés pour l'élaboration de stratégies marketing ciblées. Ces outils autour de l'analyse comportementale ont tendance à se multiplier et il y a fort à penser qu'ils seront exploités rapidement dans tous les secteurs faisant l'objet de la présente étude.

■ Sécurité

Les progrès dans les technologies de l'information et de la communication, particulièrement ceux autour de l'exploitation des Big Data, permettent aujourd'hui de développer de nouvelles applications innovantes de l'analyse comportementale qui permettent de répondre à de nouvelles problématiques, liées au domaine de la sécurité, qui regroupe plusieurs aspects : sécurité intérieure (crime et terrorisme), surveillance et maintien de l'ordre public, cybersécurité (lutte contre la fraude et l'usurpation d'identité).

À l'image du nouveau laboratoire du Pôle Judiciaire de la Gendarmerie Nationale inauguré en Mai 2015, la tendance actuelle est à la « prédictivité » et la capacité

de prévoir dans le temps et l'espace les événements à risques susceptibles d'intervenir sur le territoire. De nombreuses entreprises développent aujourd'hui des applications pour analyser les comportements qui reposent essentiellement sur l'analyse et l'exploitation de données ou plus communément appelé (*Big Data Analytics*). Cette analyse des données ouvre la voie à l'innovation des usages dans la sécurité :

■ La surveillance vidéo intelligente

Les progrès dans le traitement de signaux vidéo et d'images permettent de prévoir de potentiels comportements dangereux. À l'image de la startup française Anaxa Vida qui développe des systèmes capables de détecter des incidents (intrusion, etc.) ou des changements brutaux des comportements (mouvement de foule ou de panique par exemple).

■ Cybersécurité

La hausse de la connectivité mondiale accroît le nombre d'attaques virtuelles, comme le vol de données qui a bondi de 78 % en 2014 (1,023 milliards de données). La technique couramment utilisée est celle dite de l'hameçonnage (*phishing* en anglais) qui consiste à récupérer des informations en accédant au système d'un utilisateur (par mail, téléphone, SMS, etc.). À l'image du français ILOjects, des entreprises françaises développent des solutions autour du profilage utilisateur qui permet de prévoir le risque de fraude et d'usurpation d'identité, en analysant par exemple le comportement d'un utilisateur sur internet (mouvement de souris, vitesse de frappe au clavier). Les techniques d'analyse comportementale web d'un internaute peuvent également prendre en compte des inputs tels que son adresse IP, les sites les plus fréquentés, les heures de fréquentation etc. Cela permet notamment d'aider à cibler les comportements frauduleux (usurpation d'identité, etc.) allant jusqu'à la lutte préventive anti-terroriste.

■ Sécurité en entreprise

Au niveau de l'entreprise, les outils de GRC (Governance, Risk management & Compliance) permettent entre autres le contrôle de la conformité des actions internes à l'entreprise, qui peuvent parfois représenter une menace pour l'entreprise. Ces outils sont de plus en plus orientés vers le ciblage de comportements à risques des salariés. C'est dans ce sens que récemment, l'éditeur de logiciels Brainwave a lancé la nouvelle version de son offre IdentityGRC.

■ Sécurité des systèmes embarqués

Les systèmes embarqués sont aujourd'hui ancrés dans notre quotidien. Au-delà des dysfonctionnements liés aux défauts de conception ou de fabrication, ces systèmes sont soumis à des contraintes et interférences naturelles ou intentionnelles qui peuvent parfois perturber, voire réduire la sûreté de fonctionnement du système complet et donc perturber leur comportement. (cf. fiche « Systèmes embarqués distribués, sécurisés et sûrs »). Des moteurs d'analyse comportementaux qui surveillent et modélisent le bon fonctionnement en le comparant à un modèle comportemental – le *model-checking* – sont des techniques aujourd'hui utilisées pour la sûreté de fonctionnement des systèmes embarqués.

■ Sécurité des communications numériques

Alors que la détection de fraude sur mobile est généralement réalisée une fois que la fraude est avérée, certaines entreprises, comme la startup Fraudbuster, offrent aux opérateurs de télécoms une solution de lutte contre la fraude grâce à une analyse en temps réel du comportement des abonnés.

■ Loisirs & culture

Dans les industries créatives et culturelles, l'analyse comportementale se veut au service de l'expérience utilisateur. À l'image de l'américain du logiciel Synapse de l'américain Razer, les logiciels d'analyse comportementale s'appliquent au niveau des jeux vidéo et permettent d'analyser (statistiques, logique de cheminement, heat-maps, etc.) les pratiques et le style de jeu de l'utilisateur et les lui diffuser afin d'améliorer leurs performances et leurs expériences. Pour les nouveaux formats transmédia qui exploitent une logique de multi-devices, tout ce qui a trait aux logs, logiques de clics, etc. est interprété pour optimiser l'expérience utilisateur en adaptant notamment le niveau de difficulté du jeu à celui de l'utilisateur.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

L'analyse comportementale ouvre la voie à de nouvelles parades en termes de sécurité de par sa capacité préventive, voire prédictive, des menaces auxquelles la société est exposée. Les enjeux sont immenses, qu'il s'agisse des coûts financiers liés aux actions curatives liées à la cybercriminalité (fraude bancaire, usurpation d'identité, vol de données...), ou des conséquences d'actes de malveillance ou de terrorisme (attentats, détérioration d'infrastructures critiques...).

Dans les secteurs du médical et industriel, l'analyse comportementale permet de développer de nouvelles techniques à l'image de l'*eye tracking* – oculométrie. Cette technique consiste en l'étude du regard et du comportement oculaire et pourrait être utilisée dans nombreuses applications : l'évaluation de l'ergonomie d'un site web, d'un logiciel, mieux comprendre le comportement d'un utilisateur face à une machine (IHM), étudier ses capacités cognitives (psychologie du développement) ou encore pour la détection de maladies oculaires (ophtalmologie). Cette technologie doit pouvoir être intégrée par davantage d'acteurs en s'appuyant sur les compétences des laboratoires concernés.

Pour ce qui est des autres secteurs (moins critiques) l'analyse comportementale permet notamment de contribuer à l'amélioration du développement marketing et commercial d'une entreprise grâce à une meilleure modélisation et compréhension de chaque client ou groupes de clients.

Pour les secteurs comme les jeux ou encore la robotique domestique, cette analyse est un plus indéniable pour développer de nouvelles expériences utilisateur.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent l'analyse comportementale sont :

2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets

Les technologies influencées par l'analyse comportementale sont :

2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets

Les technologies clés qui influencent l'analyse comportementale sont :

6	Infrastructures de 5 ^{ème} génération
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées
14	Technologies immersives
21	Supercalculateurs
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les technologies influencées par l'analyse comportementale sont :

6	Infrastructures de 5 ^{ème} génération
10	Cobotique et humain augmenté
11	Intelligence artificielle
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées
14	Technologies immersives
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
21	Supercalculateurs
34	Authentification forte
47	Technologies de conception de contenus et d'expériences

Les marchés

Le domaine de l'analyse comportementale est jeune et très foisonnant, et ses technologies sont souvent des briques (ou fonctions) logicielles que l'on implémente dans un outil déjà existant comme, par exemple, l'analyse intelligente de flux vidéo ou des fonctions de tracking de l'internaute. La consolidation de données de marché est donc rendue complexe par cette intrication des chaînes de valeur.

Il faut néanmoins souligner que l'analyse comportementale et, de surcroît, prédictive est en lien étroit avec la valorisation de données (massives) et le marché de l'analyse prédictive de données. À ce titre, le cabinet américain MarketsandMarkets estime le marché de l'analyse prédictive à près de 5 milliards de dollars en 2018 (soit 4,4 milliards d'euros) avec un taux de croissance annuel moyen de 25,2 % entre 2013 et 2018, selon son rapport « Predictive Analytics Market (2013-2018) ».

Le diagnostic des tendances (et habitudes) de consommation des individus ainsi que la prévention des comportements malveillants par analyse comportementale sont des applications aujourd'hui en développement chez les grands donneurs d'ordres (sécurité, gouvernements, e-commerce, grande distribution, internet, etc.). Le suivi comportemental en entreprise est, quant à lui, en pleine émergence et peut notamment être intégrée aux outils de GRC d'une entreprise. Évalué à 5,17 milliards de dollars en 2013, le marché global des

GRC (solutions et services) pourrait atteindre 9,93 milliards de dollars en 2018, soit un taux de croissance annuel de 13,9 % sur la période¹.

Les défis technologiques à relever

Étroitement liée au Big Data et à ses 5 « V », l'innovation technologique de l'analyse comportementale repose essentiellement dans la maîtrise et la compréhension des données.

■ Maîtriser les algorithmes complexes d'apprentissage

Plus communément appelé *Machine Learning*, l'auto-apprentissage permet à un système d'apprendre en exploitant de manière intelligente les données qu'il acquiert (*data intelligence*). Ces algorithmes, qui se basent pour la plupart sur des calculs (stochastiques) complexes permettent notamment de mieux comprendre les liens cachés existant entre les données (*pattern matching*) et de modéliser ces données pour des usages telles que la prédiction de tendances et/ou de comportements. Maîtriser la data intelligence pourrait permettre de développer des nouvelles générations de logiciels (anti-virus, anti-malware, etc.) capables de détecter en amont des attaques non signées et inconnues.

1 – 2013 : Enterprise Governance, Risk and Compliance, étude Markets&Markets

Les anti-virus se basent sur les signatures de menaces connues et mises à jour. Cependant face au manque d'efficacité croissant de ces systèmes, le secteur prend le virage de la lutte prédictive contre les menaces inconnues. À l'image du français VirusKeeper, la nouvelle génération d'antivirus sera capable de détecter les virus et programmes malveillants basés sur des moteurs temps-réel d'analyse comportementale combinés aux scanners anti-virus traditionnels.

■ Optimiser les ressources nécessaires

Ces méthodes de calculs complexes sont rendues aujourd'hui possible grâce aux supercalculateurs qui mobilisent de fortes ressources énergétiques et computationnelles. Un des défis serait d'optimiser ces ressources de calcul (voir technologie clé « Supercalculateurs »).

■ Renforcer les capacités de perception des comportements – Perceptual Computing

Le Perceptual Computing est une approche intellectuelle qui permet la reconnaissance d'éléments dynamiques complexes : mouvements, regards, voix, etc. Ce concept technologique est aujourd'hui de plus en plus utilisé pour la détection de comportements à risques ou malveillants lors de la surveillance de foule. Le secteur des ICC est également impacté (cf. technologies clés « Technologies de conception de contenus et d'expériences » et « Technologies Immersives »), notamment dans les jeux vidéo où l'analyse comportementale permet aux agents virtuels d'interagir en conséquence de l'action de l'utilisateur humain. Grâce au Perceptual Computing, il est possible de proposer de nouvelles expériences utilisateur. Il est nécessaire d'encourager la recherche et développement autour de ces technologies au sein des laboratoires et autres pôles de compétitivité concernés. En effet peu d'acteurs français sont positionnés sur le Perceptual Computing. Nous pouvons toutefois citer Angus.Ai, une startup française qui développe des API de Perceptual Computing intégrables au niveau des entreprises : reconnaissance de texte, voix, mots, visages, etc.

Les défis commerciaux et d'usages à relever

■ Défis commerciaux

Face aux concurrents israéliens et américains, chez qui le développement de solutions d'analyse

comportementale pour le domaine de la sécurité est déjà à un stade avancé, le défi commercial principal est de structurer la filière, notamment en favorisant les échanges entre les PME fournisseurs de technologies et les donneurs d'ordres, qui ont des besoins croissants en termes de cybersécurité (banques, industriels, gouvernements, etc.).

Les marchés de la grande distribution, du e-commerce et du e-tourisme ont quant à eux déjà commencé leur structuration avec l'émergence de géants qui peuvent constituer des prescripteurs ou clients incontournables des solutions d'analyse comportementale, alors que la plupart des autres marchés (banques, sécurité...) sont plus foisonnants, laissant de nombreuses opportunités commerciales aux acteurs de cette technologie clé.

■ Défis d'usages

Le principal défi d'usage est l'acceptabilité, par le grand public, de ces technologies, qu'elles soient utilisées par des acteurs publics pour garantir la sécurité des individus, ou privés, dans un même but de sécurité ou avec un objectif commercial. Cette acceptabilité se heurte à deux obstacles : la collecte massive de données que l'analyse comportementale requiert, souvent au détriment de la vie privée des utilisateurs, et la remise en cause du libre arbitre qui peut être perçue par les individus lorsque ce type de technologie est utilisé pour des recommandations aux particuliers.

Les enjeux réglementaires



Une réelle problématique d'ordre éthique se pose, car la plupart de ces observations se font à l'insu de l'utilisateur. En effet, celui-ci est loin de se douter qu'un logiciel est en train d'analyser son comportement lorsqu'il entre dans un magasin ou lorsqu'il

regarde une vitrine, d'autant plus lorsque ces données sont issues des **signaux** ou des **informations** mobiles. La Cnil interdisant l'identification des personnes ainsi que l'enregistrement puis la sauvegarde des vidéos pour des copies, la plupart des analyses traitent les flux de données sans les conserver. Il est

donc indispensable de rassurer, convaincre les usagers sur les aspects anonymes et confidentiels de ces données, sans quoi la CNIL pourrait être plus sévère quant à l'exploitation et le stockage de ces données. C'est un point central fort du Big Data et de l'analyse comportementale.

Analyse AFOM

ATOUTS

Tissu académique de haut niveau
Position de leader de la France dans les secteurs de la robotique de services et dans le jeu vidéo, clients naturels de ces technologies
Nombreuses startups

FAIBLESSES

Moins capitalisées que leurs concurrentes Nord-Américaines, les PME françaises sont moins dynamiques pour pénétrer des marchés en évolution rapide
Une implémentation qui peut être longue (quelle acceptabilité par l'utilisateur ?)

OPPORTUNITÉS

Prise en compte par les pouvoirs publics et les entreprises des enjeux de sécurité
Les limites des antivirus actuels laissent place à une nouvelle génération d'antivirus
Développement de la silver économie et de la médecine à distance

MENACES

Positions et dynamiques des acteurs installés (États-Unis, Israël, Russie)
Utilisation actuelle agressive des technologies dans les médias, qui pourrait provoquer un rejet des utilisateurs

Facteurs clés de succès et recommandations

- Soutenir les PME et renforcer leurs échanges avec l'industrie et la recherche
- En effet, la France dispose d'un tissu académique et de recherche d'excellence dans le domaine de l'analyse comportementale. Toutefois, peu de startups naissent de cette recherche d'excellence en France et les PME peinent à s'approprier ces technologies pour se développer.
- Mettre en place des structures d'accompagnement et dans la recherche (R&D déportée...) et de partage des connaissances pourrait leur permettre de se développer.
- Mettre en place des structures de soutien au développement commercial et à l'export pour faire face aux concurrents israéliens et américains.
- Favoriser la recherche et les projets collaboratifs est également une piste à privilégier. Ces projets offrent aux différents acteurs la capacité à développer des technologies et systèmes complets à destination des grands donneurs d'ordres.
- Se rapprocher des pôles de compétitivité permet d'amorcer un premier accès privilégié au marché, notamment pour des purs fabricants de

briques technologiques qui s'intègrent à des systèmes déjà existants.

■ Enfin, il est pertinent de souligner que l'action des SATT dans le processus de maturation des technologies issues de la recherche sera essentielle pour les startups issues de la recherche françaises.

■ Sensibiliser davantage les acteurs des loisirs et culture à la valeur ajoutée de l'analyse comportementale pour leurs applications. Ils doivent mieux valoriser ce savoir-faire vis à vis de leurs concurrents internationaux.

■ Sensibiliser les prescripteurs (médecins) et les payeurs de la santé au potentiel de ces technologies

■ Ouvrir un débat sur une utilisation vertueuse de ces technologies, afin d'en accroître l'acceptabilité par le public

À l'image du profilage web ou de la détection automatisée de comportements malveillants, l'analyse comportementale est aujourd'hui un concept qui demeure ultra technologique et qui répond essentiellement à des usages complexes et nouveaux, souvent trop éloignés du quotidien des acteurs des ICC. Outre le secteur des jeux vidéo où elle est de plus en plus utilisée, l'analyse comportementale apporterait beaucoup de valeur aux nouvelles applications issues du secteur des loisirs et culture.

Acteurs clés :

Entreprises	Angus.Ai, ARISEM (Thalès), AxBx, Brainwave, Kronosafe, Owi, Pertimm...
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX...
Instituts Carnot	INRIA, Logiciel et Systèmes Intelligents, Voir et Entendre...
Autres centres de recherches	CHART, CogLab, CRISTAL, ENSICAEN, LIGM (UPEM), LIMSI, LIP6 (UPMC)...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

20 Nouvelles intégrations matériel-logiciel

Loisirs & culture
Énergie, MOBILITÉ , NUMÉRIQUE
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, SÉCURITÉ
Alimentation

► **Correspond à une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Systemes cyber-physiques, intégration, spécification, validation, vérification



Définition et périmètre

L'intégration correspond habituellement à une phase ou une activité dans le cycle de développement d'un système ou d'un produit (projet). Cette phase est supportée par de nombreux outils, méthodologiques mais aussi technologiques et intervient (historiquement) sur la phase montante du cycle (en V) du développement d'un projet.

Ce processus d'intégration repose sur des méthodes de gestion de projet dans lesquelles chacune des briques, matérielle et logicielle, était définie (spécifications et exigences) indépendamment les unes des autres. Cette répartition résultait d'une implication (en entreprise) des départements ingénierie et conception matérielle (hardware) et ingénierie logicielle (software) bien distincts. L'intégration matériel-logiciel consiste alors au rapprochement de ces deux « mondes ». Aujourd'hui cette phase d'intégration (à la fin du cycle en V) est communément appelée Intégration, Vérification, Validation et Qualité (IVVQ).

La tendance aujourd'hui est, depuis plusieurs années, à « attaquer » cette phase IVVQ du matériel et du logiciel plus en amont, au niveau des spécifications. D'une manière générale, l'IVVQ interviendra de plus en plus à plusieurs niveaux du cycle en V. Aujourd'hui des outils comme MARTE ou AADL permettent de représenter, dès les spécifications, les systèmes matériels et logiciels afin d'évaluer rapidement les choix technologiques à faire.

Cette technologie clé abordera les nouvelles technologies et méthodes d'intégration matériel-logiciel : *Early Validation*, *co-simulation* et *validation en continu (system-in-the-loop, processor-in-the-loop)*, *virtualisation/hypervision*, *High Level Synthesis*.

L'intégration matériel-logiciel est une composante essentielle du développement des systèmes embarqués et leurs nouvelles générations – les systèmes cyberphysiques (*cyberphysical systems*, CPS) – aujourd'hui largement utilisés dans les industries de l'aéronautique, automobile, ferroviaire, de la communication numérique, etc.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Optimiser les problématiques liées à l'intégration matériel-logiciel permet, d'une manière générale, d'améliorer le temps de mise sur le marché

(*time-to-market*, TTM) et d'améliorer la compétitivité des entreprises.

En effet, les phases d'intégrations sont en général complexes, chronophages et financièrement coûteuses de par les nombreuses itérations et l'intervention de beaucoup d'équipes projets. Prendre en compte l'intégration matériel-logiciel plus en amont permet de rapidement **identifier** et **rectifier** des potentiels *bugs* et défaillances qui peuvent véritablement avoir un effet boule de neige et bloquer un projet.

D'autre part, être capable de modéliser en amont le comportement final d'un système grâce à ces outils offrira un **gage de fiabilité** et de **sûreté de fonctionnement**.

En somme, miser sur les nouvelles intégrations permet d'**optimiser les coûts d'ingénierie en réduisant considérablement les coûts liés à la réingénierie** corrective d'un système, notamment pour les utilisateurs industriels de l'aéronautique, automobile, ferroviaire, communication numérique, nucléaire et défense.

Liens avec d'autres technologies clés

■ Les technologies clés qui influencent les nouvelles intégrations matériel-logiciel sont :

4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs

■ Les technologies influencées par les nouvelles intégrations matériel-logiciel sont :

5	Internet des objets
6	Infrastructure de 5 ^{ème} génération
11	Intelligence artificielle
14	Technologies immersives
45	Technologies pour la propulsion

Les marchés

Les nouvelles intégrations matériel-logiciel se basent essentiellement sur un cadre méthodologique de tests, qui reposent sur des pratiques techniques : utilisation de bibliothèques spécifiques d'un langage et d'un environnement informatique (virtuel...) donné. Il est à l'heure actuelle délicat de quantifier un marché de ces outils que l'on peut toutefois qualifier de niche.

Néanmoins, il est essentiel de citer le marché des systèmes embarqués, pour lesquelles ces méthodes et technologies d'intégration seront un véritable facteur de compétitivité pour les entreprises du secteur. Le gouvernement français estime le marché mondial de l'embarqué à 130 milliards d'euros, un taux de croissance annuel de 5 %, dont 10 milliards d'euros en France dans la synthèse du plan « Logiciels et systèmes embarqués » de 2014.

D'une manière générale, le caractère diffusant de la technologie sert l'ensemble des marchés sur lesquels cette intégration est nécessaire, des systèmes embarqués aux systèmes complexes : automobile, aéronautique, spatial, défense, ferroviaire, communications, etc. Les impacts marchés sont donc extrêmement importants et diversifiés.

Les défis technologiques à relever

■ Valider plus en amont et en continu

Modéliser – virtualiser selon le terme consacré dans le secteur – est une pratique très courante.

■ Le *hardware-in-the-loop* (HIL) permet d'intégrer dans un système de tests des composants physiques réels, dont la simulation serait coûteuse et peu représentative.

■ À l'inverse, le *software-in-the-loop* (SIL) permet d'intégrer dans une validation le modèle logiciel d'un composant.

■ Le *processor-in-the-loop* (PIL) permet de vérifier le code objet (compilé) qui sera déployé par la suite sur le système physique réel.

■ Les hyperviseurs sont des plateformes de virtualisation sur lesquels il est possible de tester et vérifier plusieurs systèmes d'exploitation simultanément sur un même système physique réel.

On parle également d'émulation du matériel afin de visualiser son comportement sur lequel on peut tester des algorithmes et codes logiciels et, de facto, valider en continu si les artefacts et modèles logiciels sont adaptés au matériel. Cela permet de s'affranchir de démonstrateurs ou prototypes coûteux qui sont confrontés au risque de ne pas fonctionner.

À titre d'exemple, la startup française Krono-Safe envisage d'ajouter des capacités d'hyperviseurs dans ces outils d'intégrations de ses systèmes d'exploitation temps-réel (RTOS).

■ Platform based design : réingénierie logicielle et adhérence matériel-logiciel

Pour des raisons économiques et de réduction des coûts, il arrive que des entreprises ne cherchent pas à concevoir le matériel et se le procurent dans le commerce (communément appelé « sur étagère »). Les approches pour l'intégration sont alors différentes. Ces composants matériels dits « sur étagère » ont un cycle de vie relativement court, généralement d'une dizaine d'années, au regard des produits ou systèmes finaux (un avion par exemple) dans lesquels ils seront embarqués, qui ont une durée de vie d'une quarantaine d'années. Cela entraîne des processus de migration logicielle vers de nouvelles plateformes, on parle alors de réingénierie logicielle.

Cette réingénierie (réécriture du code) peut amener à des baisses de performances et de fiabilité du logiciel et, de surcroît, un dysfonctionnement du nouveau matériel, surtout quand l'adhérence du logiciel à son matériel est importante.

Le défi sous-jacent est de limiter considérablement cette adhérence matériel-logiciel.

■ Synthèse matériel-logiciel

L'approche dite du *High-Level Synthesis* permet, à partir de spécifications fonctionnelles pures basées sur des contraintes de performances (consommations, etc.) de partitionner le matériel et le logiciel et faire la synthèse technique du système. À titre d'exemple, Thales s'est procuré des licences CatapultC (de Mentor Graphics Corp.) afin de synthétiser un système matériel-logiciel suivant un jeu de spécifications en input. Cette tendance au High-Level Synthesis est de plus en plus forte chez les industriels.



■ Comprendre les nouvelles architectures

Les nouvelles générations de processeurs ne sont plus de « simples » processeurs généralistes mais sont des coprocesseurs alliant CPU (processeurs central) et GPU (processeur graphique) afin d'augmenter les capacités de calcul (notamment dans les supercalculateurs). Le point bloquant de ces nouvelles architectures est que les logiciels d'aujourd'hui ne sont pas optimisés pour pleinement tirer parti de ces coprocesseurs.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les défis commerciaux relatifs à l'intégration matériel-logiciel à proprement parler sont de l'ordre de la diffusion des pratiques dans les chaînes de valeurs, des donneurs d'ordres vers les sous-traitants.

Au-delà de ces pratiques, les enjeux sont les enjeux de toutes les filières applicatives, en termes de fiabilité, de modularité ou de coût des systèmes : automobiles, trains, avions, systèmes de paiement, de communication, infrastructures numériques critiques, etc.

Les enjeux réglementaires

Le cadre normatif de développement des systèmes embarqués est déjà bien en place et respecté, qu'il s'agisse de standard de développement matériel, logiciel, d'intégration ou de sûreté de fonctionnement, composantes critiques des systèmes intelligents des transports, à l'aube du transport autonome. La certification d'un système avoisine en moyenne 70 % du coût total du développement du système, il est donc crucial de prendre en compte les nouvelles intégrations dans ces normes et standards.

Analyse AFOM

ATOUTS

Recherche française dynamique.

Quelques PME à la pointe : Kronosafe par exemple, TrustinSoft, Prove & Run, IS2T

Les grands intégrateurs et donneurs d'ordres français intègrent déjà ces questionnements.

FAIBLESSES

Faible implication des PME françaises sur ces méthodes

OPPORTUNITÉS

Traction du marché pour des solutions types Kronosafe, hypervision

MENACES

Les entreprises américaines sont les véritables orchestres du secteur.

Facteurs clés de succès et recommandations

■ À court terme : développement de plateformes de recherche technologique

Mettre en place des programmes de subvention R&D pour le développement de plateformes R&T amont des nouvelles intégrations matériel-logiciel, notamment à destination des IRT, comme SystemX, qui entre autres se penchent sur ces problématiques. Ces plateformes pourraient par exemple jouer, simuler, émuler des scénarii auxquels seraient confrontés les systèmes cyber-physiques de demain.

■ À long terme : besoin important en formation

Confronter nos futurs jeunes ingénieurs en systèmes embarqués et logiciels aux réelles problématiques

liées à l'intégration des deux briques ne va pas au-delà de l'aspect théorique et des quelques travaux pratiques qu'ils réalisent dans le cadre de leurs études. Développer des plateformes académiques collaboratives de recherche où les étudiants seraient confrontés à ces problématiques d'intégration pourrait être une des clés du succès.

■ Renforcer notre tissu d'entreprises innovantes

Face à des acteurs américains qui orchestrent le secteur, il faut que les entreprises de demain prennent des risques, à l'image de Krono-Safe qui exploite et développe ces nouvelles méthodes d'intégration dans ces systèmes.

Acteurs clés :

Entreprises	Airbus, Alcatel-Lucent, Altran, Alten, AKKA, Continental, Dassault Systemes, Kronosafe, PSA Peugeot Citroën, Renault Technocentre, Safran, Segula, Thales Communications & Security, Thales Research and Technology, Valéo, Viotech, Zodiac Aerospace...
IRT, ITE, IHU	IRT Saint-Exupéry, SystemX...
Instituts Carnot	CEA LIST, INRIA, Logiciel et Systèmes Intelligents, ONERA...
Autres centres de recherches	CentraleSupélec, Ecsel (Artemis - Programme Européen), ESIEE, IRSEEM, LIP6 (UPMC), LSV, Plateforme de la filière automobile, Sogeti High Tech...
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, Astech, IDforCAR, I-Trans, LUTB, Pegase, Véhicule du futur, SCS, Systematic, TES...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

21 Supercalculateurs

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, NUMÉRIQUE
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, SÉCURITÉ
Alimentation

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Supercalculateurs, superordinateurs,
calcul intensif, calcul distribué, calcul
réparti, calcul parallèle, calcul vectoriel
GPU, flops, High Performance Computing,
HPC, modélisation de données complexes,
simulation haute performance, Énergie,
Environnement, Santé



Définition et périmètre

Un supercalculateur (ou superordinateur) est un système conçu pour atteindre des performances de calcul ultra-élevées et ultra-rapides (on parle alors de calcul intensif) de grandes masses de données. L'unité de calcul est exprimée en flop, qui désigne le « nombre d'opérations à virgules flottantes par seconde » et qui est une unité de mesure commune de la puissance d'un système informatique. Les deux applications principales des supercalculateurs sont d'une part le Calcul Haute Performance (CHP, High Performance Computing en anglais), et d'autre part l'analyse des données complexes, qui est de plus en plus répandue dans de nombreux segments.

Les supercalculateurs sont basés sur plusieurs types d'architectures : la grille de calcul (ou calcul réparti) qui consiste à mobiliser dans un environnement virtuel un ensemble de ressources informatiques partagées/distribuées (association de plusieurs milliers de PC domestiques – projet Seti@home), et le calcul en parallèle qui consiste à distribuer plusieurs segments d'une équation complexe sur plusieurs processeurs afin de les calculer simultanément. Une capacité ultra élevée de calcul nécessite également une capacité ultra élevée de stockage, qui, à l'heure actuelle atteint déjà plusieurs pétaoctets (million de milliards d'octets).

Le supercalculateur se déploie dans deux domaines principaux, domaines pour lesquels la technologie est développée initialement :

■ Sécurité

— Sécurité des données

Fortement liée à l'analyse comportementale, l'authentification forte et la valorisation de données massives, le calcul intensif trouve également des applications dans le secteur de la sécurité. Notre quotidien est de plus en plus « virtualisé », paiement, identification et authentification par *smartphone*, ou la reconstitution du profil comportemental d'un individu qui par exemple exigent une capacité de calcul conséquente dans le but de valider ou non une action.

— Risques industriels

La simulation numérique du fonctionnement d'une arme nucléaire peut être réalisée à l'aide d'un supercalculateur. Cela permet d'arrêter les essais et, de ce fait, de s'affranchir de la conception de prototypes expérimentaux « à usage unique » qui, in fine, engendraient

des coûts de prototypages conséquents et des externalités négatives. Le Tera-100, installé au très grand centre de calcul (TGCC) du CEA, dispose d'une puissance de calcul d'1 pétaflop (1 million de milliards d'opérations par secondes), permet de disposer de moyens de simulation nécessaires à la conception et à la garantie des armes nucléaires sans essais¹.

■ Numérique

Les acteurs des télécoms et de l'internet comme les GAFA (Google, Apple, Facebook et Amazon) sont amenés quotidiennement à gérer une quantité gigantesque de données. Fortement en lien avec le Cloud et le Big Data dans leurs grands *datacenters*, le calcul intensif trouve sa place dans le traitement de ces données massives. À ce titre, on voit aujourd'hui l'explosion du Deep Learning ou de méthodes de calcul par intelligence artificielle qui s'appuient sur de nouvelles architectures où les GPU (Graphical Process Unit) prennent de plus en plus le pas sur les CPU (Central Process Units). Les supercalculateurs offrent également la possibilité d'élargir le champ du *software as a service* (Logiciel en tant que Service ou SaaS).

Cette technologie trouve également des applications dans les domaines :

■ Environnement

Le réchauffement climatique est depuis plus de dix ans devenu une préoccupation internationale. La capacité de prévoir et d'anticiper les évolutions météorologiques devient alors un enjeu de poids et devient possible par l'acquisition, la simulation et la modélisation d'une quantité massive et complexe de données météorologiques et climatiques.

À ce titre, Météo-France s'est équipé de deux supercalculateurs, fabriqués par le français Bull, en janvier 2014, ce qui lui permet de multiplier sa capacité de calcul total par 12 et d'atteindre une puissance crête de 1 pétaflops.

Les supercalculateurs seront notamment utilisés pour vérifier la qualité des informations envoyées par le satellite SWOT, qui sera mis en orbite en 2020 pour des applications liées à l'océanographie.²

1 – Le calcul haute performance au CEA "<http://www-hpc.cea.fr>"

2 – BARNIER B., 9 Juin 2015 : « Supercalculateurs : la course à la puissance », Les Échos.

■ Habitat

Le BIM (Building Information Modeling) est une technique de modélisation d'un bâtiment par maquettage numérique. Au-delà de la maquette 3D classique, le BIM peut s'apparenter à une plateforme de développement collaborative entre les différents acteurs d'un projet du bâtiment, pouvant aller jusqu'à l'échelle d'un quartier, voire d'une ville entière.

La grande flexibilité offerte à ses utilisateurs (ajout de données au fur et à mesure du projet, retraitement des informations, ajout de la dimension temporelle) réside dans une capacité de calcul élevée qui peut être fournie par un supercalculateur.

■ Santé et bien-être

Le génome est l'ensemble du matériel génétique codé dans l'ADN et les chromosomes et son étude est cruciale dans notre société (cf. technologies clé « Ingénierie Génomique »). Le séquençage du génome requiert aujourd'hui une exploitation et un stockage de quantités massives de données génétiques. Le français Bull a équipé le Centre National de l'Analyse Génomique de Barcelone d'un supercalculateur doté de 1 200 cœurs de calculs (soit 800 Giga bases/jour) et de 2,7 pétaoctets de stockage.

Lancé fin 2013 par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne et en collaboration avec 22 pays européens, le projet scientifique Humain Brain Project vise d'ici environ 10 ans (2024) à modéliser et simuler informatiquement le fonctionnement du cerveau humain et ses milliards de neurones. Le coût du projet est estimé à 1,2 Md€ sur 10 ans. La plateforme High Performance Computing dédiée au projet cumule près de 10 pétaflops de capacité de calcul, ce qui permet notamment la simulation de modèles cellulaires de plus de 100 millions de neurones.

■ Énergie

L'approvisionnement en énergie demeure un enjeu de taille. Le contexte sur les ressources énergétiques naturelles pousse les pouvoirs publics ainsi que les entreprises à optimiser l'exploitation des ressources énergétiques. Les supercalculateurs s'imposent également comme une solution fiable pour des applications autour de l'énergie. À ce titre, Total s'est doté d'un nouveau supercalculateur - Pangea - (conçu par la Silicon Graphics International pour 60 millions d'euros) afin d'analyser un grand nombre de données géologiques

ou sismiques et simuler l'efficacité de la production de réservoirs d'hydrocarbures. Inauguré en mars 2013, ce supercalculateur est 15 fois plus puissant que son prédécesseur : il dispose d'une puissance de calcul de 2,3 pétaflops avec une capacité de stockage de 7 pétaoctets. Le groupe pétrolier français envisage d'utiliser les futurs supercalculateurs dits « exaflopiques » pour la modélisation encore plus précise et plus complexe des réservoirs pétroliers.

D'autres applications existent dans le domaine de l'énergie :

- Identification de gisements de pétrole et de gaz (CGG aligne, en cumulé, près de 12 pétaflops crête de capacité de calcul)
- Simulation des réacteurs nucléaires (EDF...)
- Étude des écoulements autour des pâles d'éoliennes
- Modélisation des fluides complexes
- ...

■ Mobilité

Couplée à des algorithmes complexes d'intelligence artificielle, la modélisation et la prédiction du trafic routier pourraient être des applications possibles des supercalculateurs. La modélisation de la déformation d'un véhicule lors des essais en crash tests, la modélisation aérodynamique et acoustique relèvent également du calcul intensif.

■ Loisirs & culture

- Industrie cinématographique

Les applications des supercalculateurs concernent entre autres la conception pour les acteurs du cinéma des logiciels de calcul d'images 3D (qualité et réalisme des images ; énormes quantités de données à traiter, transférer, stocker, protéger) et la modélisation de scènes réelles à partir d'une très grande quantité de vues 2D.

- Industrie des jeux vidéo

Les jeux massivement multi-joueurs nécessitent de plus en plus de puissance de calcul compte tenu de contraintes de cohérence et de temps réel. Les problématiques concernent les exigences toujours accrues dans la qualité et le réalisme des images, la simulation du monde virtuel calculée pour tous les joueurs en temps réel et de façon cohérente, la gestion de

l'interaction avec le joueur, l'adaptation dynamique du contenu visuel et sonore et la connexion avec les serveurs de distribution dans le réseau.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les supercalculateurs sont considérés comme un réel levier pour la compétitivité des entreprises de par leur capacité à résoudre les équations les plus complexes dans les domaines des sciences, de l'ingénierie, de l'industrie et de l'économie. Ce constat se voit renforcé par la convergence des technologies du calcul intensif et du Big Data pour l'analyse de données massives.

- Permet de réduire les coûts et la durée des calculs

Pour le secteur de la génomique, l'expansion de supercalculateurs de plus en plus performants dans ce domaine a permis de considérablement réduire les coûts et la durée du séquençage. En effet pour 100 M\$ en 2001, le coût du séquençage génomique est de 10 M\$ en 2007 et décroît entre 5 000 et 10 000 dollars en 2014.

L'architecture parallèle des supercalculateurs offre de sérieux avantages concurrentiels. La simulation (écoulement de l'air le long de la coque et des ailes,

ainsi que le comportement des matériaux) du Falcon 7X de Dassault Aviation afin d'améliorer l'aérodynamisme, optimiser la consommation de carburant et la manœuvrabilité de l'avion, a représenté « seulement » 200 heures (soit 8 jours) de calcul pour 140 millions d'équations réparties sur 1 000 processeurs parallèles. Ce même calcul aurait pris 1000 fois plus de temps sans ce type d'architecture (soit 22 ans). Cette simulation a été réalisée avec le Tera 10 du CEA.

- Permet une expansion du SaaS comme modèle d'exploitation logicielle

Les supercalculateurs peuvent résoudre des millions d'équations à la seconde. Ces performances sont un levier de poids pour l'expansion du modèle d'exploitation de logiciel sous forme d'un service déporté (SaaS). Fortement lié au Cloud Computing et au Big Data, les SaaS sont aujourd'hui principalement utilisés par des PME en France et amenés à se démocratiser d'avantage.

Les domaines de l'*infrastructure as a service* (IaaS) et du *platform as a service* (PaaS) profiteront également des progrès liés au calcul intensif, au Big Data et au Cloud.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les supercalculateurs sont :

- 1 Matériaux avancés et actifs
- 2 Capteurs
- 3 Valorisation et intelligence des données massives
- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique
- 5 Internet des objets
- 6 Infrastructures de 5^{ème} génération
- 11 Intelligence artificielle
- 13 Communication sécurisée
- 14 Technologies immersives
- 19 Analyse comportementale
- 20 Nouvelles intégrations matériel-logiciel
- 46 Nanoélectronique

Les technologies influencées par les supercalculateurs sont :

- 2 Capteurs
- 3 Valorisation et intelligence des données massives
- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique
- 5 Internet des objets
- 6 Infrastructures de 5^{ème} génération
- 11 Intelligence artificielle
- 13 Communication sécurisée
- 14 Technologies immersives
- 19 Analyse comportementale
- 20 Nouvelles intégrations matériel-logiciel
- 46 Nanoélectronique

Les marchés

■ Pays leaders

Le cabinet IDC estime le marché des supercalculateurs en 2012 à 10,3 Md\$. *Market Search Media* et prévoit qu'il pourrait atteindre 44 Md\$ d'ici à 2020.

En 2014, la France figurait dans le top 10 du marché des calculateurs, tant en nombre (30), soit 5,9 % de part de marché, qu'en termes de puissance de calcul (14 pétaflops cumulés et 17 pétaflops crête) (4,9 %). Les États-Unis sont les leaders mondiaux de ces deux classements avec 231 supercalculateurs recensés (45,5 % de parts de marché) avec une puissance cumulée de calcul de 136 pétaflops (43,6 %) jusqu'à 195 pétaflops crête, suivis par la Chine avec 61 supercalculateurs (12 % de parts de marchés) avec une

puissance de calcul cumulée de 52 pétaflops (16,6 %) jusque 99 pétaflops crête. Le Japon et le Royaume-Uni et l'Allemagne précèdent la France dans ce top 10.

Toutefois, c'est la Chine qui possède le calculateur le plus performant au monde depuis 2013 : Tianhe-2 et ses 33 pétaflops (55 pétaflops crête).

■ La chaîne de valeur

Il existe 3 acteurs prédominants dans le secteur des supercalculateurs : HP, IBM et Cray. Par ailleurs, les fabricants de composants (processeurs, coprocesseurs, mémoire, etc.) jouent un rôle clé. NVIDIA et Intel sont les deux grands leaders du domaine et capitalisent à eux deux 70 à 80 % du marché. Atos, qui a racheté Bull en 2014, est le dernier acteur en Europe capable de concevoir des supercalculateurs à l'état de l'art mondial.

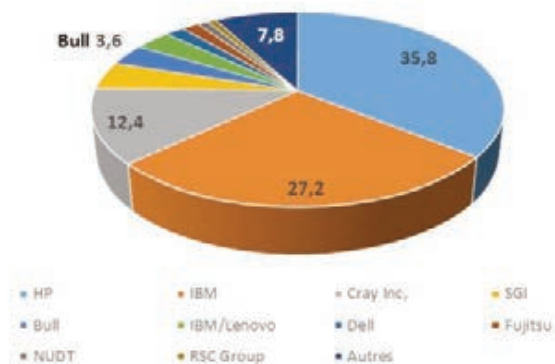


Figure 1 : Part des marchés des fabricants de supercalculateurs en 2014 (en %)³

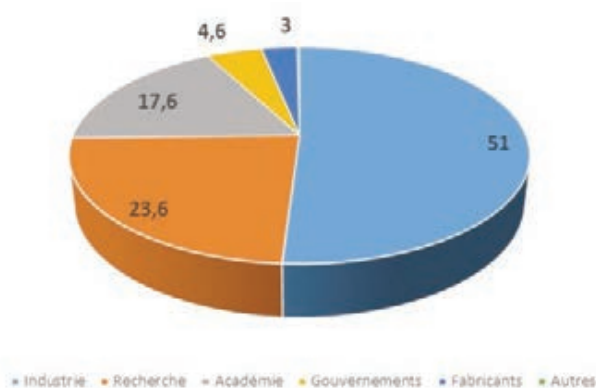


Figure 2 : Répartition de l'utilisation des supercalculateurs par segments d'application (en %)⁴

3 – Statistics top 500 Supercomputing sites <top500.org>

4 – Statistics top 500 Supercomputing sites <top500.org>

Les défis technologiques à relever



■ La consommation énergétique

La consommation d'énergie est un verrou important et représente un enjeu crucial pour les développements futurs. Pangea, le supercalculateur de Total, avec une capacité de calcul de 2,3 pétaflops nécessite une puissance électrique de 2,8 MW soit la consommation d'une ville de 20 000 habitants pour le calcul et pour être refroidi.

C'est dans ce sens qu'en septembre 2014 l'Université Joseph Fourier à Grenoble s'est dotée d'un supercalculateur refroidi à l'eau tiède, Froggy⁵, à destination de ses chercheurs via le mésocentre de calcul CIMENT (Calcul Intensif Modélisation Expérimentation Numérique et Technologique) et le MaiMoSiNE (Maison de la Modélisation et de la Simulation, Nanoscience et Environnement). Un circuit de refroidissement primaire fait circuler un liquide à l'intérieur de plaques en contact avec les composants et lames de calcul (processeurs, mémoire, disques durs). Un circuit de refroidissement secondaire permet d'échanger la chaleur de chaque composant où l'eau circule à une température maximale de 30°C.

Le cluster OCCIGEN de Bull installé au grand équipement national de calcul intensif (Genci) d'une puissance de calcul de 2,1 pétaflops sera également refroidi par de l'eau non réfrigérée, qui lui permet de maintenir un PUE⁶ (indicateur d'efficacité énergétique) de 1,1, la moyenne européenne étant autour de 2,6.

Enfin, le projet européen Mont Blanc, lancé en 2011 et qui réunit des acteurs espagnols (Barcelona Super-

computing Center), français (CNRS, Bull, CEA, Université de Montpellier et de Grenoble) ou encore du Royaume-Uni (ARM Limited) se penche sur l'amélioration du rendement énergétique des futurs supercalculateurs exaflopiques en basant leur fabrication à partir de composants (processeurs) de *smartphone* à très bas coûts, notamment en combinant le Cortex-A15 d'ARM, conçu pour fonctionner sur de petites batteries, avec un GPU. Ce projet est financé par la communauté européenne à hauteur de 22 M€ jusqu'en septembre 2016.

■ Nouvelles architectures : la course à l'exaflop.

Qu'il s'agisse d'Atos/Bull, IBM ou Cray Inc., les ambitions exaflopiques n'ont jamais été aussi fortes. À ce titre, Atos s'est fixé deux jalons dans cette quête : livrer des machines 30 fois plus puissantes en 2015-2016 (30 pétaflops) et encore à nouveau 30 fois plus puissantes en 2020 (900/1 000 pétaflops).

Le DoE (*Department of Energy*) américain a annoncé fin 2014 qu'il investirait 325 M\$ d'ici à 2017 pour le développement de deux supercalculateurs afin d'atteindre des capacités de calcul de 150 et 300 pétaflops, soit 5 à 10 fois plus puissants que les supercalculateurs les plus puissants actuels. Ces derniers serviront à la simulation d'armes nucléaires. Leur clé pour réussir ce défi est le recours à la technologie NVLink, qui est l'interface d'interconnexion permettant aux GPU et aux CPU d'échanger des données 5 à 12 fois plus rapidement qu'aujourd'hui. Ces supercalculateurs seront également conçus suivant l'architecture des nouvelles générations de GPU NVIDIA Volta où les modules mémoires seront empilés et placés sur la même couche de silicium que le cœur du GPU.

■ Nouveaux algorithmes : vers l'intelligence artificielle.

Andrew Ng, le responsable scientifique du moteur de recherche Baidu (équivalent de Google en Chine) déclare dans le cadre du EmTech MIT de 2014 « *Whoever wins AI, wins the Internet* » (celui qui maîtrise l'intelligence artificielle, maîtrisera Internet). Étroitement lié avec la technologie dite de Big Data, l'intelligence artificielle permettrait d'améliorer les capacités à structurer des grandes quantités de données, qui sont notamment recueillies et traitées dans les datacenters opérés par des supercalculateurs. La tendance est au développement des algorithmes de Deep Learning, basée sur le réseau de neurones (cf. fiche technologie clé « intelligence artificielle »).

5 – CNRS 2014 <<http://ecoinfo.cnrs.fr/article335.html>>

6 – Power Usage Effectiveness : rapport entre la puissance consommée du datacenter et celui du cluster seul

■ Vers des supercalculateurs quantiques ?

Dans le cadre d'un projet de recherche, Google et la NASA ont ouvert en 2012 un laboratoire avec pour objectif d'étudier l'informatique quantique et l'intelligence artificielle. Ce nouveau laboratoire, baptisé « Quantum Artificial Intelligence Lab » est installé au sein de l'unité NASA Advanced Supercomputing et est équipé d'un ordinateur quantique, D-Wave Two, de l'entreprise canadienne D-Wave Systems. La particularité de cet ordinateur est qu'il est équipé d'un processeur quantique qui traite des « qubits » ou « quantum bit » : contrairement à un bit « classique », sa valeur n'est ni 0 ni 1 mais les 2 à la fois.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Qu'il s'agisse de fournisseurs de technologies comme NVIDIA ou Intel, ou de fabricants comme Atos/Bull, HP ou IBM, les acteurs majeurs ont aujourd'hui une forte assise sur le secteur et se positionnent quasiment comme les décideurs des évolutions technologiques. Cela peut influencer certaines entreprises, principalement des PME et ETI à revoir leurs modèles

Analyse AFOM

ATOUTS

La France fait partie des 5 leaders mondiaux avec Atos

La maîtrise des technologies des supercalculateurs est soutenue dans le cadre du développement de la solution « Économie des données » de l'Industrie du Futur.

OPPORTUNITÉS

Déploiement international de la marque Bull grâce à son intégration dans le groupe Atos

L'ambition exaflopique d'Atos

Les marchés applicatifs sont porteurs : simulation, calcul intensif et Big Data

économiques afin d'échanger commercialement avec ces mastodontes du secteur.

La réussite pourrait résider dans la maîtrise complète de la chaîne de valeur. La Chine se lance sur ce défi et souhaite avoir la capacité de développer elle-même ses composants jusqu'ici développés par les américains NVIDIA, Intel et AMD et avoir également la capacité d'intégration comme IBM ou Atos.

« IBM a revendu l'année dernière au chinois Lenovo sa division de serveurs à base de processeurs à architecture Intel et AMD. Big Blue sort ainsi du plus gros segment des superordinateurs au profit du chinois Lenovo qui, à son tour, pourrait alors débarquer très rapidement et très violemment sur le marché »⁷.

Les enjeux réglementaires

Les données qui circulent dans les calculateurs sont parfois critiques au niveau gouvernemental et force les gouvernements à établir des restrictions à l'export, comme Nvidia et Intel qui se voient interdits de fournir des puces et composants destinés aux supercalculateurs chinois qui seraient, selon le gouvernement américain, utilisés pour développer des technologies nucléaires et militaires.

FAIBLESSES

Atos détient une faible part de marché (3,6 %) face à HP et IBM

Aucun français parmi les fournisseurs de technologies de composants, comme NVIDIA ou Intel

MENACES

Les industriels extra-européens bénéficient d'aides importantes accordées par leurs États.

Les États-Unis et la Chine avancent plus vite, et débloquent beaucoup de fonds pour le développement des futurs supercalculateurs

7 – VANNIER P., 01 Mai 2015 : « Pourquoi la France doit rester dans la course des supercalculateurs », La Tribune.

Facteurs clés de succès et recommandations

Le soutien d'une offre technologique européenne de supercalculateurs, rivalisant avec les offres extra-européennes, permettra de maintenir la France dans le top 5 de ce secteur. Ce soutien est déjà amorcé grâce au « contractual public private partnership » (CPPP) dans le cadre du programme Horizon 2020 de la Commission Européenne et

grâce à l'action « Calcul Intensif » dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA) ou encore avec la solution « Économie des données » de l'Industrie du Futur qui identifie les supercalculateurs comme une technologie stratégique, notamment au titre de ses applications dans le Big Data.

Acteurs clés

Entreprises	Atos – Bull, Centre National de Recherches Météorologiques, Dassault Aviation, EDF, Teratec, Total...
Instituts Carnot	INRIA
Autres centres de recherches	Ex@tech – Exascal, LIX - Ecole Polytechnique, PRISM, Très Grand Centre de Calcul – CEA, Université de Montpellier - Centre HPC@LR...
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, Systematic...
Autres (clusters, associations, fédérations professionnelles, réseaux d'entreprises)	FPDC, GdR Robotique, Genci, SYMOP, SYROBO...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

22 Réseaux électriques intelligents

Loisirs & culture
ÉNERGIE, MOBILITÉ, NUMÉRIQUE
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

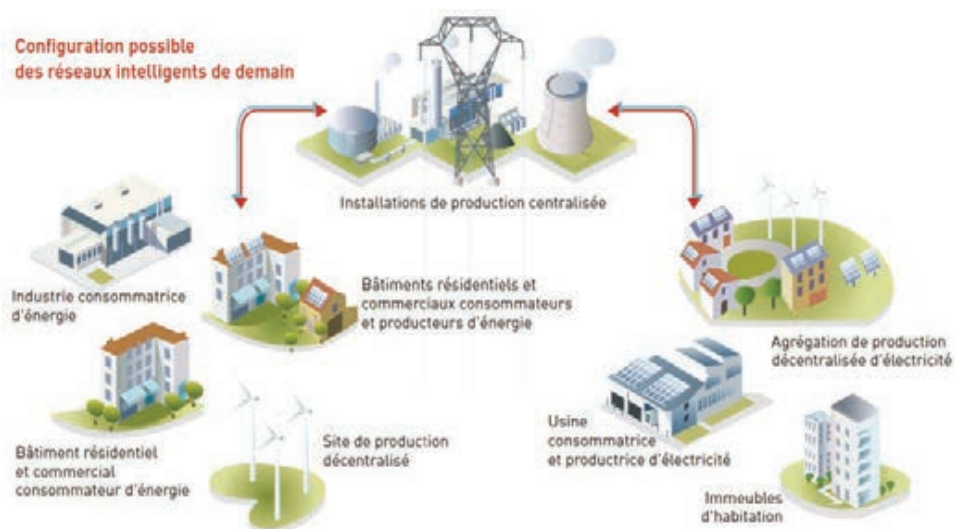
► Correspond à
une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Smart-grids ; réseaux électriques intelligents.



Définition et périmètre



« Évolution possible de l'architecture et des fonctionnalités pour les réseaux électriques de demain »

(source : Feuille de route sur les réseaux et systèmes électriques intelligents intégrant les énergies renouvelables, ADEME, 2011)

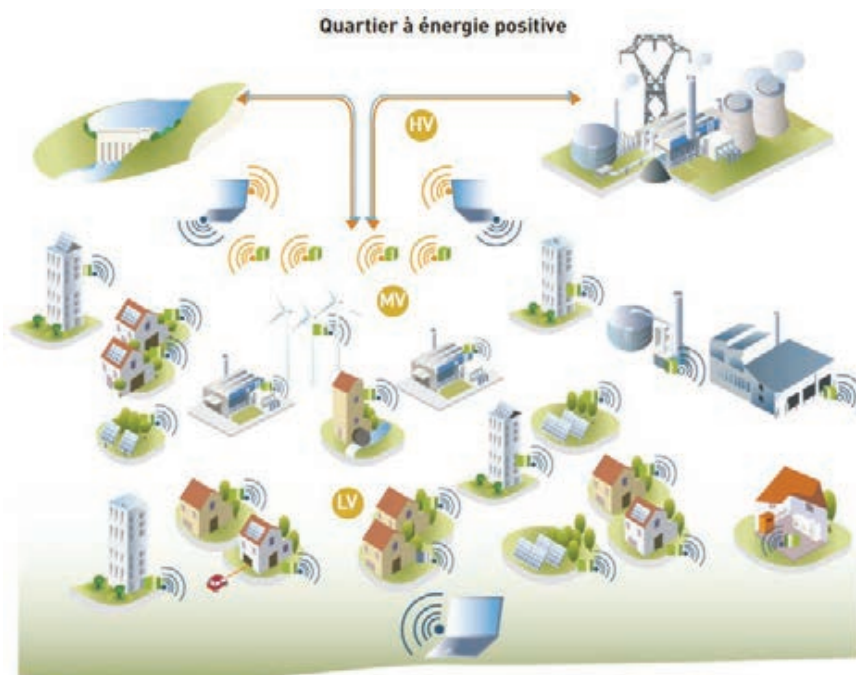
Un réseau électrique intelligent (REI) est un système électrique capable d'intégrer de manière plus efficace les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs afin de maintenir une fourniture d'électricité durable, économique et sécurisée. Les technologies associées s'articulent autour des éléments suivants :

- un réseau de transport et de distribution d'électricité comportant notamment des équipements (sous-stations, réseaux de capteurs) permettant la communication entre les parties prenantes du système (producteurs-distributeurs-consommateurs) et l'ensemble des

systèmes de contrôle pour optimiser la gestion de la distribution, ajuster la production et prévenir les dysfonctionnements du réseau ;

- des compteurs électriques installés chez les consommateurs et capables d'échanger avec le réseau en temps réel afin de mieux maîtriser la demande, de lisser les pics de consommation et d'effectuer des relevés à distance ;

- des systèmes de production et de stockage de l'énergie en partie décentralisés, et permettant par exemple des flux bidirectionnels d'électricité vers un réseau de stations de rechargement de véhicules électriques.



« Quartier à énergie positive »

(Source : Feuille de route sur les réseaux et systèmes électriques intelligents intégrant les énergies renouvelables, ADEME, 2011)

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les réseaux électriques intelligents apportent des réponses à deux évolutions majeures.

La première concerne les usages en matière de consommation d'électricité, en croissance continue (climatisation, appareils électroniques, etc.) ; cette tendance devrait être amplifiée par l'apparition de nouveaux usages tels que la recharge de véhicules électriques.

La seconde se situe au niveau de la production d'électricité. La multiplication prévue des installations exploitant des sources d'énergie renouvelables complexifie les profils de production électrique.

Les réseaux électriques publics actuels n'ont pas été conçus pour de tels usages et des productions d'électricité intermittentes. La modernisation des outils et de la gestion des réseaux est essentielle, le seul renforcement des infrastructures n'étant pas suffisant.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les Réseaux électriques intelligents sont :

2	Capteurs
3	Valorisation et intelligence des données massives
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
5	Internet des objets
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération
25	Technologies de l'hydrogène
42	Solaire photovoltaïque
43	Energies éoliennes

Il n'y a pas de technologies influencées par les Réseaux électriques intelligents

Les marchés

Au niveau mondial, l'investissement global dans les réseaux électriques intelligents s'est élevé à 14,9 milliards de dollars en 2013, soit 5 % de plus qu'en 2012¹. Le chiffre d'affaires global de ce secteur a été de 44,1 milliards de dollars en 2014 et devrait atteindre 70,2 milliards de dollars en 2023². La Chine est passée devant les États-Unis du point de vue des investissements dans les technologies pour réseaux électriques intelligents en 2014.

Le marché des REI peut être séparé en trois segments : les applications pour le client, les compteurs communicants et l'infrastructure associée, et les applications réseau.

Des plans de déploiement de compteurs communicants sont annoncés pour les prochaines années : 360 millions en Chine d'ici 2030, 240 millions en Europe d'ici 2020, 130 millions en Inde, 63 millions au Brésil, 60 millions aux États-Unis et 24 millions en Corée du Sud. L'analyse des données pourrait représenter à elle seule un marché de 4,1 milliards de dollars d'ici 2015. Avec l'accélération du déploiement des compteurs intelligents, la taille de ce marché pourrait être multipliée par 10 d'ici 2020³.

1 – Source : Agence Internationale de l'Énergie.

2 – Source : Navigant Research, 2014.

3 – Source : SmartGrids France, ITEMS International – nov. 2012.

Le marché français cumulé des compteurs communicants électriques (Linky) et à gaz (Gazpar) devrait atteindre 6 milliards d'euros d'ici 2022⁴. Les années 2014 et 2015 marquent un tournant avec l'arrivée à maturité de l'effacement et des compteurs communicants.

Les défis technologiques à relever

Le besoin d'intégrer des technologies très diverses est la plus grande barrière dans le développement et le déploiement des REI.

Microgrid Il s'agit d'un système énergétique îloté, qui permet à un bâtiment ou à un quartier de s'approvisionner en électricité de façon autonome, tout en étant connecté au réseau général. Il se compose de sources d'énergie, d'un réseau local, d'outils de pilotage et de moyens de stockage de l'énergie. Ses applications et son dimensionnement sont variés, allant de la recharge d'une flotte de véhicules électriques à l'alimentation d'habitations dans des régions isolées. Il peut s'agir de réseaux de courant à basse tension ou à courant continu conçus de manière à minimiser les pertes d'énergies.

Les technologies de réseau Il s'agit des matériels et des systèmes électrotechniques, dont les équipements à base d'électronique de puissance de type FACTS

4 – Source : Greenunivers – rapport CleanTech 2015.

(« Flexible AC Transmission Systems »), qui doivent être adaptés aux évolutions de l'architecture des réseaux et à l'insertion des sources de production décentralisées. Ces systèmes sont une brique de base des REI et permettent notamment de minimiser les pertes sur le réseau.

Les systèmes d'information Ils concernent les outils utilisés pour la gestion du réseau électrique et sont par conséquent au centre de la gestion intelligente. L'augmentation de la quantité et de la diversité des informations reçues implique le développement d'outils de gestion capables non seulement de piloter le réseau mais aussi de pouvoir fournir de nouveaux services.

Les technologies de stockage centralisé et décentralisé L'équilibre entre la demande et l'offre est largement réalisé en ajustant l'énergie produite par le biais de générateurs pilotables (hydraulique, à combustion, etc.) possédant leurs propres réserves d'énergie sous forme d'eau ou de combustibles. Néanmoins, l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix de production implique le développement de technologies adaptées pour le stockage. L'hydrogène et les batteries en sont des exemples.

La sécurité des réseaux et systèmes électriques intelligents Il est nécessaire de développer et de standardiser une approche « prêt-à-l'emploi » pour améliorer la sécurité dans les réseaux et aux points d'acheminement. Ce type de mesure est nécessaire pour la protection des lignes électriques et des points de distribution ainsi que des informations transmises à travers les réseaux.

Le réseau de communication à haut débit L'implémentation d'une bande de communication haut débit permettra le développement à l'échelle du réseau des mesures en temps réel.

Les capteurs Ils jouent un rôle central dans le développement des REI. Des réseaux de capteurs bas coût sont par exemple nécessaires pour détecter des anomalies et des dégradations sur le matériel et la production.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les réseaux électriques intelligents vont faire naître de nouveaux services pour les consommateurs. Leur adoption par ces derniers dépendra fortement de leur valeur ajoutée et de la répartition de leur coût, compte

tenu de la fragmentation de la chaîne de valeur. La question de la gestion des données des consommateurs est hautement sensible.

Les différences dans les standards et les configurations des réseaux électriques entre les pays constituent le principal défi commercial à l'exportation des technologies développées au niveau national.

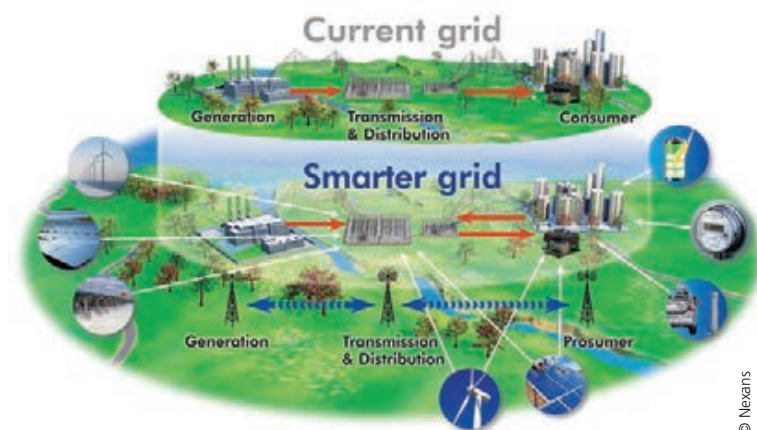
Les enjeux réglementaires

La directive européenne 2009/72/EC impose à tous les membres de l'Union Européenne d'avoir terminé le déploiement de leurs compteurs intelligents en 2022.

Le mécanisme de capacité, prévu par la loi NOME et instauré par le décret n° 2012-1405 du 14 décembre 2012, devrait contribuer à assurer la sécurité d'approvisionnement du système électrique à long terme. Il vise, entre autre, à donner un espace économique aux outils de gestion de la pointe de consommation, notamment l'effacement.

Depuis 2015, les fournisseurs d'électricité ont l'obligation de démontrer chaque année leur capacité à couvrir la consommation de leurs clients. Cette obligation est encadrée par RTE par le biais d'un certificat. Les capacités de production d'appoint et principalement les capacités d'effacement y sont mises en avant.

Le développement à l'international des technologies pour les réseaux intelligents sera facilité par la normalisation des protocoles associés à la mise en œuvre des réseaux intelligents. Les organismes de normalisation de l'industrie des technologies de l'information et de la communication et des autres filières associées comme l'automobile pour le véhicule électrique, doivent en être les acteurs centraux.



© Nexans

Analyse AFOM

ATOUTS

Expertise française reconnue dans la conception de réseaux électriques et de communication

Présence d'acteurs sur toute la chaîne de valeur

Rôle moteur de plusieurs industriels majeurs

FAIBLESSES

Concurrence entre acteurs nationaux

OPPORTUNITÉS

Soutien affirmé au niveau européen

Projets démonstrateurs à différentes échelles territoriales

Nécessité d'accompagner le développement des énergies renouvelables et des véhicules électriques

MENACES

Incertitudes sur les niveaux d'investissement qui seront nécessaires

Protection des données perçue comme insuffisante

Entrée sur le marché d'acteurs internationaux du secteur des TIC

Facteurs clés de succès et recommandations

Dans son rapport « Energy Technology Perspectives » de 2015, l'Agence Internationale de l'Énergie a formulé trois recommandations :

- une réglementation permettant des investissements rentables sur les technologies de réseaux de distribution avancés sont nécessaires pour soutenir le développement du marché ;

- des mécanismes de marché sont nécessaires pour garantir que les consommateurs et les fournisseurs partagent le coût et les bénéfices du réseau intelligent ;

- des standards internationaux sont nécessaires pour accélérer la recherche et le développement.

Acteurs clés :

Entreprises	Actility, Alcatel-Lucent, Alstom Grid, Artelia, Cofely Ineo, Direct Energie, EDF, Energy Pool, Engie – Cylergie, Nova Watt, RTE, Sagemcom R&D, Schneider Electric Electropole, Total, Vinci Energies, Voltalis...
IRT, ITE, IHU	Supergrid...
Instituts Carnot	Energies du Futur, INRIA...
Autres centres de recherches	CentraleSupélec, CRIGEN, G2Elab, L2EP, Projet LiveGrid, Smart Electric Lyon...
Pôles de compétitivité	Advancity, CapDigital, Derbi, Images et Réseaux, Minalogic, S2E2, SCS, Systematic...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Actémium, Smart Grid Energy...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

23 Batteries électrochimiques de nouvelle génération

Loisirs & culture
ÉNERGIE, MOBILITÉ, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► Correspond à
une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

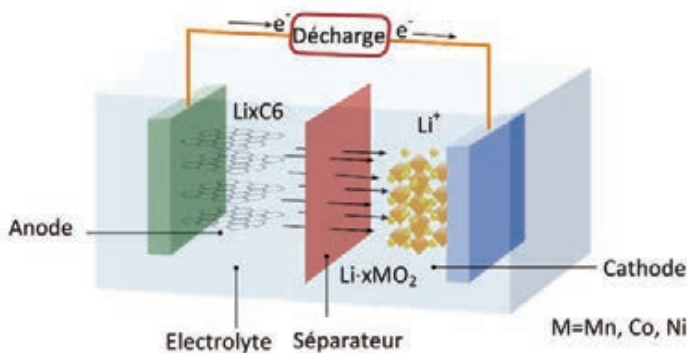
Batteries électrochimique ; Li-ion ;
Sodium-soufre ; Redox Flow ;



Définition et périmètre

Le principe du stockage électrochimique est de conserver l'énergie électrique sous forme chimique. Les systèmes de stockage électrochimiques sont extrêmement intéressants car l'énergie stockée est directement convertie en énergie électrique : l'électricité et l'énergie chimique partagent le même vecteur énergétique, l'électron. Le process électrochimique ne requérant pas de transfert de chaleur, il est très efficace et typiquement les rendements de conversion des batteries sont supérieurs à 85 %.

Une batterie est un système composé de cellules électrochimiques mises en réseau. La puissance et l'énergie stockées vont être fonctions de la configuration de mise en réseau et du nombre de cellules. La capacité de stockage de puissance et d'énergie varie en fonction des technologies (plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, sodium-soufre, zebra).



Cellules électrochimique d'une batterie

(Source: Automotive Energy Supply Corporation, 2007)

Il existe plusieurs types de batteries, se différenciant par les espèces chimiques mises en jeu :

Li (Li-ion & Li-polymère) Les batteries Li-ion utilisent un composé du lithium comme matériau électrode. Elles possèdent une grande densité d'énergie et nécessitent peu de maintenance. Néanmoins, elles présentent des risques en cas de surcharge, des coûts de fabrication élevés et sont difficilement recyclables. Les batteries **Li-Polymère** sont une catégorie de batteries au lithium dont l'électrolyte est un polymère microporeux. Celles-ci présentent des risques, mais aussi une densité d'énergie, moins importants.

Sodium-soufre (Na-S) Les électrodes liquides sont des formes ioniques de sodium (pôle négatif) et de

soufre (pôle positif). L'électrolyte solide intermédiaire est une céramique d'alumine. Elles présentent une haute densité énergétique et une bonne cyclabilité. Elles emploient des matériaux corrosifs et fonctionnent à haute température (de 300 à 350 °C). Cette technologie est adaptée pour les applications « grande échelle » telles que les industries électro intensives, les grands systèmes de back-up... Enfin, ces batteries ont une grande efficacité (jusqu'à 90 %) et une forte densité énergétique.

Batterie à flux circulants (Redox flow) L'énergie est stockée suivant le même mode que pour les piles à combustibles. Elles sont constituées de 2 demi-cellules, l'une pour l'oxydation, l'autre pour la réduction, séparées par une membrane échangeuse d'ions. La puissance produite est fonction de la taille de la membrane tandis que la quantité d'énergie dépend de la taille du réservoir d'électrolyte. Les batteries à flux ont l'avantage de nécessiter peu de maintenance, d'être propres et d'avoir une durée de vie importante.

Les batteries acides avancées Elles sont une évolution des batteries acides traditionnelles. Les électrodes en carbone permettent d'augmenter la cyclabilité et l'élasticité de la charge. Cette technologie est déjà employée pour le stockage d'électricité du réseau électrique général.

Les piles à combustible, qui sont également des dispositifs électrochimiques, sont incluses dans la fiche Technologies de l'hydrogène du présent ouvrage.

On peut citer également **les supercapacités**. Elles permettent de délivrer en un temps court, une puissance importante. Elles peuvent être couplées avec une batterie afin de créer un système combinant les bénéfices des deux technologies. Les développements des supercapacités portent sur l'augmentation de la densité d'énergie.

De nombreuses technologies de batteries sont en émergence : Li-S, Li-air, Na-ion ou encore le tout solide.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le marché des véhicules électriques est encore émergent et leur source d'énergie est un enjeu clé. L'industrie européenne des batteries est en retard, celle d'Amérique du Nord également, mais dans une moindre mesure avec des effets d'échelle attendus

avec les développements, notamment de la Tesla. Il y a un fort risque que lorsque le marché des véhicules électriques sera mature, les acteurs asiatiques soient devenus les leaders incontestés de la fabrication des cellules ou des batteries, déplaçant la chaîne de valeur de la mobilité électrique vers l'Asie.

Les batteries électrochimiques de nouvelle génération permettent de faciliter l'intégration des énergies renouvelables sur le réseau et de mieux gérer les pointes de consommation électrique en effectuant du report

de charge. Elles sont des éléments du développement des énergies renouvelables intermittentes, telles que le photovoltaïque ou l'éolien.

La France a fait des batteries pour véhicule une de ses priorités, en l'inscrivant dans sa liste des 9 solutions industrielles de son plan de la nouvelle France industrielle. En outre, le stockage de l'énergie est la première des sept priorités de la commission « Innovation 2030 ».

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les Batteries électrochimiques de nouvelle génération sont :

- | | |
|----|--|
| 1 | Matériaux avancés et actifs |
| 2 | Capteurs |
| 4 | Modélisation, simulation et ingénierie numérique |
| 45 | Technologies pour la propulsion |

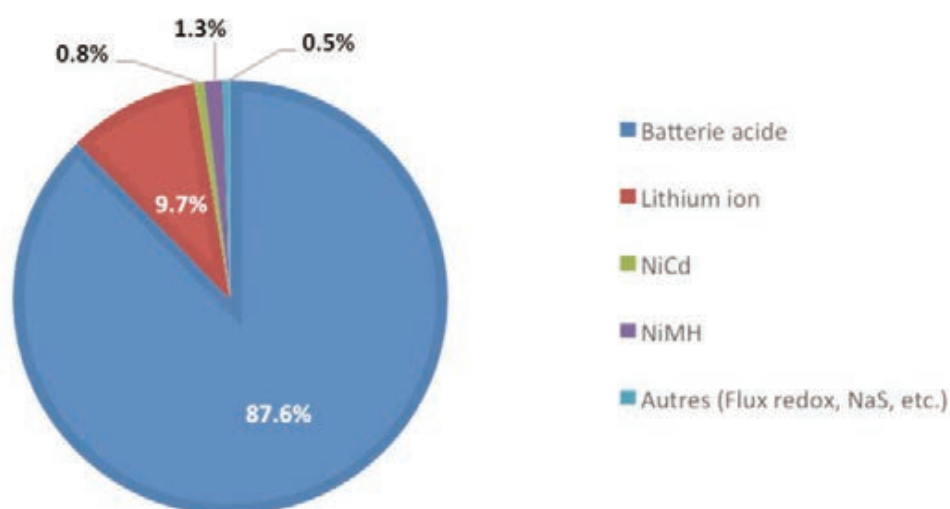
Les technologies influencées par les Batteries électrochimiques de nouvelle génération sont :

- | | |
|----|----------------------------------|
| 2 | Capteurs |
| 22 | Réseaux électriques intelligents |
| 42 | Solaire photovoltaïque |
| 43 | Energies éoliennes |
| 45 | Technologies pour la propulsion |

Les marchés

Marché global Le marché mondial des batteries électrochimiques (toutes applications confondues) s'est élevé à environ 380 GWh en 2013. Il est dominé à 90 % par les batteries acides. L'autre part du marché

représentant une capacité de 47 GWh est composée des technologies Lithium (environ 37 GWh), NiCd (environ 3GWh), NiMH (environ 5 GWh), et autres solutions (environ 2 GWh) telles que les batteries à flux redox et NaS (*source : Avicenne energy, 2014*).

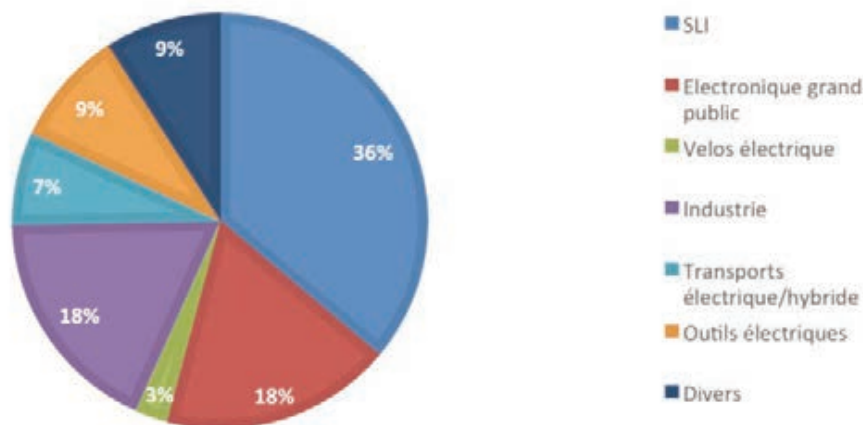


Répartition du marché mondial des batteries électrochimiques (en capacité électrique GWh) par technologie de batterie - toutes applications confondues (*source : Avicenne energy, 2014*)

En termes de revenus, le marché global¹ en 2013 s'est élevé à 54 milliards de dollars : 33 milliards de dollars (Md \$) pour les batteries acides, 18 Md \$ pour les batteries au lithium, 1 Md \$ pour les NiMH, 2 Md \$ pour les autres solutions.

Les applications Le segment applicatif le plus important est celui des batteries pour le démarrage, l'éclairage et l'allumage (SLI) des voitures, bateaux, camions, etc : il représente 20 Md \$. Le reste du marché se par-

tage entre environ 10Md \$ pour l'électronique grand public, environ 1,4 Md \$ pour les vélos électriques, 10 Md \$ pour l'industrie (chariots élévateurs, stockage stationnaire pour les télécommunications, médical, éclairage de secours), 4 Md \$ pour le transport électrique (EV) ou hybride (HEV), 5 Md \$ pour les outils électriques incluant les outils pour le jardinage, et environ 2 Md \$ pour les applications diverses (chaise roulante, outils médicaux, etc.).



Répartition du marché mondial des batteries électrochimiques (en chiffre d'affaire) par application (toutes technologies de batteries électrochimiques confondues) (source : Avicenne energy, 2014)

Automobile L'automobile représente 5 GWh des ventes mondiales, soit un marché de 2,1 Md \$ en 2013. Ces véhicules utilisent des batteries Li-ion et NiMH. En 2013, la technologie Li-ion comptait pour les deux tiers des ventes de batteries dans l'automobile en termes d'énergie. Selon des prévisions de croissance, elle devrait être la seule technologie utilisée à l'horizon 5 à 10 ans, avec une croissance annuelle de 20 % par an, pour atteindre 10 Md \$ en 2025 (source : Avicenne energy, 2014).

Le coût du pack de batteries a diminué très rapidement depuis 2006, passant de 1300 dollars par kWh à 410 dollars par kWh en 2014. Les entreprises leaders telles que Tesla Motors et Renault-Nissan affichent même des coûts inférieurs à 300 dollars par kWh (source : B. Nykvist et al., 2015).

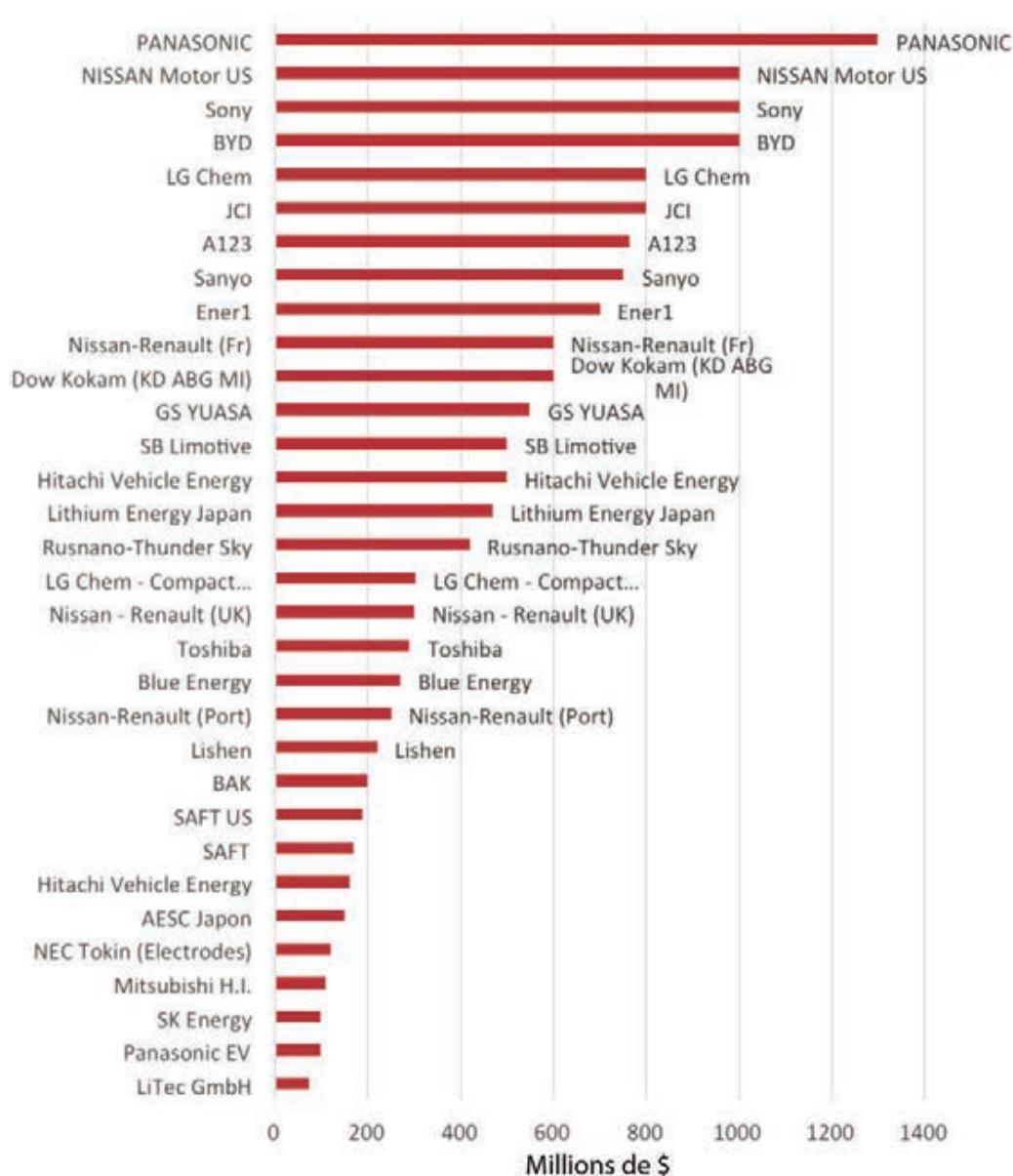
En France, le revenu généré par le marché des batteries pour véhicules électriques était de 380 M\$ en 2012. La France devrait représenter 16,2 % du marché

global des batteries pour les véhicules électriques en 2020 (source : Research Market, 2012).

Applications à grandes échelles Le chiffre d'affaires mondial des cellules pour les applications à grande échelle est de 221,8 millions de dollars en 2014. Il devrait atteindre 17,8 milliards de dollars en 2023. Les batteries Li-ion sont les plus utilisées sur le marché des batteries reliées au réseau électrique général (source : Navigant Research, 2014). Le déploiement de l'éolien et du photovoltaïque devrait tirer ce marché.

Investissements industriels La capacité de production de batteries sur le territoire européen est en retard par rapport à l'Asie et l'Amérique du Nord. Les investissements prévus jusqu'en 2015 en Europe représentent moins de 5 % de l'investissement total mondial. En Europe, la France, avec SAFT et BATSCAP, mais aussi RENAULT, est bien positionnée (source : The European Association for Advanced Rechargeable Batteries, 2013). Cependant, replacé à l'échelle mondiale, l'investissement de ces acteurs en Europe est faible.

¹ – Pack de batterie (cellules, cellules assemblées et connecteurs mais ne contient pas l'électroniques de puissances telles que les convertisseurs de courant continue)



Montant des investissements totaux (millions de dollars) pour la fabrication de batteries Lithium-ion

(Source : Avicenne Énergie, 2014)

Les défis technologiques à relever

La France est plutôt bien positionnée dans le paysage européen, mais celui-ci est en retard par rapport aux acteurs asiatiques qui investissent beaucoup et à tous niveaux de la chaîne de l'innovation. Dans l'hexagone, les acteurs de la R&D sont cependant bien présents avec des innovations à horizon 10 à 15 ans. Les acteurs

se sont organisés dans le cadre d'un réseau européen : ALISTORE-ERI, initié et mené par des acteurs français.

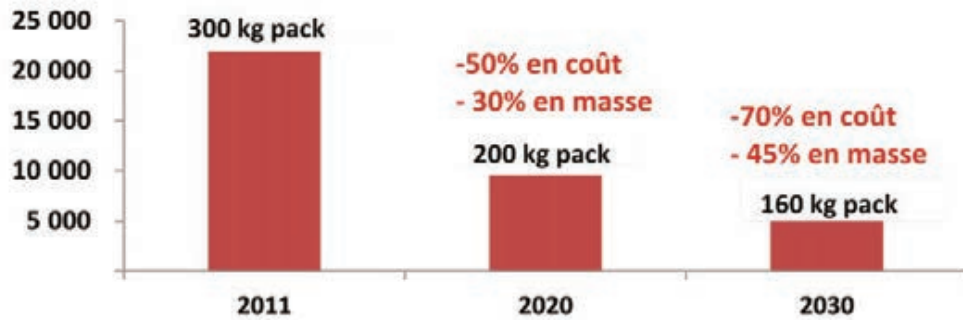
Les batteries électrochimiques de nouvelles générations ont en commun nombre d'enjeux et de verrous :

- diminuer les coûts,
- augmenter la capacité de stockage (densité énergétique et/ou puissance),
- augmenter les rendements de stockage/déstockage,

- améliorer la durée de vie,
- réduire l'impact environnemental (éléments non toxiques, recyclables),
- préserver les ressources (matériaux abondants),
- améliorer la sécurité.

Les objectifs chiffrés pour les batteries sont l'amélioration de la durée de vie à 15 ans et la réduction du

coût de moitié. Ainsi pour le marché des véhicules électriques (EV), l'objectif est d'atteindre un coût du pack de 100 à 150 \$/Wh à l'horizon 2020 (sources : *ambassade française au Japon & DOE 2012*). Tesla a annoncé viser le seuil bas de cette fourchette pour ses batteries d'ici une décennie². L'objectif de densité énergétique est 200-300 Wh/kg, contre environ 100 Wh/kg aujourd'hui).



Coût de batterie pour voiture électrique (batterie de dimension moyenne 30kWh) [source : *element energy, 2012*]

Les principaux travaux menés pour répondre à ces défis sont les suivants :

Na-ion La substitution du lithium (Li) par le sodium (Na) permet de réduire d'environ 35 fois le coût lié à cet élément. Le Na permet également de développer des batteries répondant aux enjeux du développement durable. Néanmoins, ces batteries sont moins performantes que les Li-ion et il faut par conséquent axer les efforts de R&D dans cette direction. La technologie Na-ion devrait être commercialisée dans les 5 à 10 ans.

Systèmes hybrides L'hybridation de systèmes de stockage consiste à combiner deux ou plusieurs technologies de batteries afin de compenser les défauts d'un système par les avantages d'un autre. Ces architectures peuvent s'appliquer aux systèmes photovoltaïques pour lisser la production d'énergie. Le développement porte sur l'optimisation de l'intégration sur le réseau.

Anode Les anodes de graphite et de carbone dur atteignent des performances de 300 mAh/g. Pour la nouvelle génération d'anodes, composée d'intermétalliques et de liant, les nanophases d'oxyde métallique ou encore les adhésifs conducteurs devraient permettre d'atteindre 600 mAh/g.

Cathode Les cathodes ont des performances de 120 – 160 mAh/g en utilisant des oxydes stratifiés, des spinelles et des olivines. Des oxydes multi-stratifiés, des phosphates métalliques et des surfaces structurées pourraient permettre d'atteindre 300 mAh/g.

Électrolyte Les liquides organiques, les solvants et les gels autorisent des tensions jusqu'à 4 Volts. La nouvelle génération de batteries vise des tensions de 5 Volts en utilisant des électrolytes à haut voltage, des électrolytes pour le lithium métal, des électrolytes ininflammables.

Gestion active des batteries De nouveaux développements peuvent améliorer les performances et la sécurité tout en diminuant le coût.

Tests de sécurité La sécurité des batteries peut être un frein à leur commercialisation. Un exemple de risque associé aux batteries Li-ion est le dégagement de gaz toxiques lors de la combustion accidentelle du système. L'évaluation précise des risques, de façon à les maîtriser et orienter les recherches en conséquence est primordiale (test de surcharge, court-circuit, chauffage adiabatique, etc.).

Recyclage Les procédés pour le recyclage des batteries existent. Néanmoins les boucles actuellement utilisées pour les batteries au lithium doivent être adaptées aux batteries de véhicules électriques.

² – Straubel (CTO et co-founder de Tesla) à la convention annuelle du "the Edison Electric Institute" qui s'est tenue à la nouvelle Orléans le 11 juin 2015.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'industrie française de la fabrication de batteries est bien positionnée en Europe. Néanmoins cette dernière a une capacité de production très largement inférieure à celle des zones Asie et Amérique du Nord. L'industrie asiatique notamment est supportée par le fort développement du marché des batteries pour les applications grand public (*source : E-mobility Roadmap for the EU battery industry, 2013*).

Les acteurs leaders du marché ont consenti des investissements conséquents pour la création d'outils industriels permettant d'obtenir des économies d'échelle. Par exemple, Tesla, avec le japonais Panasonic, a investi 5 milliards de dollars dans une usine géante au Nevada (États-Unis).

Les fabricants de batteries et les utilisateurs cherchent encore le modèle économique optimal. L'échec de Better Place sur le « battery switching » en est un exemple. Les modèles de partenariats entre les motoristes et les fabricants de batteries sont diversifiés :

- Renault a signé un accord en 2014 avec Bolloré pour l'utilisation des batteries de ce dernier
- Tesla assemble des cellules fabriquées par PANASONIC
- ...

Le marché du stockage pour le stationnaire est limité avec beaucoup de concurrence et des technologies très hétérogènes : STEP, volant à inerties, hydrogène, etc. Le principal inconvénient des batteries réside dans le coût de l'installation. L'utilisation des batteries pour le réseau électrique nécessite de bas coût et une maintenance limitée.

Tesla a très récemment lancé une offre pour le stockage résidentiel. La batterie est destinée à être rechargée par le biais d'énergies renouvelables ou sur le réseau électrique général. Le coût relativement bas de ce système, par rapport aux systèmes actuels (\$250 / kWh),

peut ouvrir le marché du stationnaire « grand public » aux batteries au lithium.

Les enjeux réglementaires

Les réglementations liées aux batteries concernent le plus souvent leur utilisation dans la mobilité. Plus que pour d'autres applications, la mobilité implique des risques d'agressions mécaniques, électriques et thermiques qui doivent être maîtrisés afin de garantir la sécurité des personnes à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule (*source : INERIS*). Les batteries Li-ion sont également concernées par les réglementations de transport des matières dangereuses : ce cadre regroupe leur transport en tant que marchandise. Le cadre réglementaire des véhicules prévoit également la sécurité électrique.

L'Institut national de l'Environnement industriel et des risques (INERIS) a développé la certification ELLICERT pour des batteries, des cellules et des packs destinés aux véhicules électriques et hybrides rechargeables. Cette certification attribue un niveau ou une classe de sécurité (3 classes A, B et C) en fonction de la résistance à des dysfonctionnements ou agressions électriques, mécaniques ou thermiques. Les exigences requises ont été définies en collaboration avec les fabricants de batteries, les constructeurs automobiles et les gestionnaires de flottes, les experts nationaux de la filière, une organisation de consommateurs et une représentation des collectivités territoriales (*source : INERIS*).

Le domaine du stockage stationnaire ne bénéficie pas de réglementation spécifique. Les matériaux utilisés dans la fabrication des batteries électrochimiques sont soumis au système européen d'enregistrement REACH.

La directive européenne 2006/66/EC sur les DEEE impose un taux de recyclage de 50 % pour les batteries lithium ion (*source : Roadmap eurobat e-modility*).

Analyse AFOM

ATOUTS

Acteurs de la recherche de premier plan, leaders sur le périmètre européen, et organisés en réseau

Plusieurs grands industriels à tous les niveaux de la chaîne de valeur, y compris la fabrication des cellules.

FAIBLESSES

Peu d'infrastructures de recherche avale (plateformes, instituts de recherche),

Trop faibles investissements industriels,

Taille de la production insuffisante pour réaliser des économies d'échelle.

OPPORTUNITÉS

L'affirmation d'une ambition nationale via les 9 solutions industrielles françaises,

Besoin de moyens des stockages de l'énergie pour les énergies intermittentes, notamment dans les DOM-TOM, développement des véhicules hybrides et électriques. Ressources de R&D importantes au niveau européen (programmes H2020 énergie et transports)

MENACES

Très lourds investissements des acteurs historiques des batteries pour l'électronique grand public, mais aussi des acteurs chinois et américains, qui visent l'atteinte des objectifs de réduction des coûts de production

Facteurs clés de succès et recommandations

Un soutien aux nouvelles générations de batteries électrochimiques doit être apporté au niveau de la recherche et du développement afin de maintenir un haut niveau de compétences.

L'abaissement du coût dans le domaine des batteries dépend fortement des effets d'échelle, l'investissement à l'échelle industrielle doit être encouragé.

Acteurs clés :

Entreprises	Arkema, Blue Solutions (ex-BATSCAP), E4V, Easyli, EDF, Hutchinson, NawaTechnologies, SAFT, Saint Gobain – Cree, Saint Gobain Glass – Crdc, Solvay, Solvonic ...
Instituts Carnot	CIRIMAT, Energies du Futur, ICEEL ...
Autres centres de recherches	CEMHTI(Orléans), ICG-AIME (Montpellier), ICMCB, ICR, IEMN, IMN, IPREM (Pau), IS2M (Mulhouse), LCMCP (Paris), LEPMI, LG2A, LRCS (Amiens), MADIREL, PECSA - Laboratoire Physicochimie des Electrolytes, Colloïdes et Sciences Analytiques ...
Pôles de compétitivité	Mov'eo, Tenerrdis...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Loisirs
& culture

ÉNERGIE,
MOBILITÉ,
Numérique

Environnement, Habitat,
Santé et bien-être, Sécurité

Alimentation

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Biomasse énergie ; biocarburants ;
biogaz ; hydrolyse enzymatique ;
fermentation ; biodiesel ;
bioéthanol.



Définition et périmètre

Les carburants de synthèse couvrent une large palette de carburants produits à partir de matières contenant les éléments chimiques hydrogène et carbone : charbon, biomasse, gaz naturel et même directement H_2 et CO_2 . Les technologies utilisant le charbon et le gaz sont utilisées au stade industriel de longue date, tandis que celles exploitant des ressources alternatives sont en plein développement.

Les biocarburants sont une classe de carburants de synthèse se présentant sous forme liquide ou gazeuse et qui sont issus de la biomasse. On les classe habituellement en trois catégories :

- Les biocarburants dits « conventionnels » sont produits à partir de ressources alimentaires (cane à sucre, betterave, céréales, colza, maïs, tournesol, arachide, palme, soja, etc.) ou de déchets (huiles usagées, graisses animales). Maîtrisés à l'échelle industrielle, ils représentent l'essentiel de la production actuelle ;

- Dans le cas des biocarburants de nouvelle génération, les procédés mis en œuvre visent en particulier à valoriser l'intégralité de la plante. Ainsi, la biomasse ligno-cellulosique (BLC), provenant de déchets agricoles, de résidus forestiers, de bois, de plantes dédiées à croissance rapide, etc., est employée. Elle est principalement composée de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine dans des quantités variables suivant sa provenance. Au sens de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, les biocarburants dits « avancés » sont définis comme devant être produits à partir de matières premières qui ne compromettent pas la vocation alimentaire d'une terre et ne comportent pas ou peu de risques de changements indirects dans l'affectation des sols ;

- A plus long terme, des biocarburants pourront être produits à partir de ressources alternatives, telles que la biomasse marine, principalement des algues. De nombreux défis technologiques et économiques restent à résoudre avant d'envisager son utilisation au stade industriel.

Les procédés de production de biocarburants de nouvelle génération se répartissent en deux grandes familles : la voie thermochimique (par gazéification et pyrolyse) et la voie biochimique (par hydrolyse enzymatique et fermentation).

La voie thermochimique par gazéification de la biomasse produit un gaz de synthèse contenant un mélange de monoxyde de carbone (CO), de l'hydrogène (H_2) et d'autres molécules carbonées. Il peut être utilisé pour la synthèse d'hydrocarbures liquides par réaction de Fischer-Tropsch (réaction de polycondensation du CO), ou bien combiné avec un mélange de H_2 et de dioxyde de carbone (CO_2) afin de produire du méthanol (CH_3OH). Si l'hydrogène est produit par le biais de l'électrolyse de l'eau, l'oxygène généré peut être utilisé lors de l'étape de gazéification pour augmenter et contrôler le taux de production de H_2 et de CO par rapport à celui de l'eau (H_2O) et du CO_2 dans le gaz de synthèse.

La voie thermochimique peut également recourir à la pyrolyse de la biomasse pour produire une huile brute contenant une grande variété de composés chimiques caractérisés par leurs fonctions (acides, aldéhydes, alcools, etc.) et leur poids moléculaire (des formaldéhydes aux sucres complexes). Cette huile peut être directement transformée en hydrocarbures par le biais d'une étape d'hydrotraitement afin de diminuer sa quantité d'oxygène et la rendre alors soluble avec des hydrocarbures fossiles. Une autre voie de valorisation est la gazéification de l'huile afin de l'utiliser comme produit intermédiaire.

La voie biochimique permet de convertir deux macromolécules principales : les sucres et les lipides. Elle se déroule en 4 étapes : la première, le prétraitement, a pour objectif de libérer la fraction hydrolysable de la BLC ; la deuxième, l'hydrolyse enzymatique, consiste à transformer les hémicelluloses et la cellulose en sucres ; la troisième, la fermentation par des microorganismes, a pour rôle de transformer les sucres en éthanol ; la quatrième, la distillation et la déshydratation, permet de séparer le mou de l'éthanol. Chacune de ces étapes comporte des difficultés, comme l'obtention de meilleurs rendements sans dégrader les sucres lors de l'hydrolyse enzymatique, ou encore la transformation simultanée des glucoses et des sucres à cinq carbones ($C5$ - pentoses) lors de la fermentation.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les carburants de synthèse permettent de répondre à plusieurs défis : en offrant un débouché supplémentaire aux filières agricoles locales, en réduisant les

émissions de gaz à effet de serre, en anticipant l'épuisement des réserves mondiales de pétrole et en réduisant la dépendance énergétique vis-à-vis des hydrocarbures.

Le secteur des transports contribue à hauteur d'un quart des émissions de gaz à effet de serre (GES) de la France. L'utilisation de biocarburants pour les véhicules permet de diminuer cette part.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les carburants de synthèse sont :

- 1 Matériaux avancés et actifs
- 2 Capteurs
- 8 Procédés relatifs à la chimie verte
- 15 Procédés relatifs à la chimie du pétrole
- 25 Technologies de l'hydrogène

Il n'y a pas de technologies influencées par les carburants de synthèses.

Les marchés

Au niveau mondial, le bioéthanol a représenté en 2010 73 % de la consommation de biocarburants (en teneur énergétique). En 2011, les États-Unis, premiers producteurs mondiaux, ont été contraints d'exporter massivement leur production, en Europe, au Brésil, au Canada et en Asie. En 2014, l'éthanol cellulosique, biocarburant de 2^e génération, est devenu une réalité commerciale aux États-Unis avec l'ouverture de trois sites de production pour une capacité totale de 47 millions de gallons (environ 140 kt) par an. Le site de DuPont devrait également commencer à entrer dans sa phase commerciale en 2015 avec une capacité de 30 millions de gallons par an. La production annuelle des États-Unis sur l'année 2014 en bioéthanol cellulosique s'est élevée à environ 33 millions de gallons.

En Europe, la production de biodiesel s'est élevée en 2013 à 10 367 kt¹. Il s'agit quasi-exclusivement de biodiesel de 1^{ère} génération. Actuellement, l'industrie européenne est en surcapacité : avec 23 093 kt de capacités de production de biodiesel recensées en 2014, les installations sont sous-utilisées, en particulier dans des pays tels que l'Espagne ou l'Italie. Cette situation résulte d'une vague d'investissements déclenchée par l'annonce des objectifs initiaux d'incorporation de biocarburants au niveau européen, rapidement suivie par une forte augmentation des importations de biodiesel en provenance d'Amérique du Sud et d'Asie du Sud-Est. L'origine des exportations a également changé au

cours des dernières années en raison de l'introduction par la Commission européenne de frais douaniers anti-dumping pour le biodiesel et le bioéthanol importés des États-Unis², et le biodiesel importé d'Argentine et d'Indonésie³. En 2013, plus de 400 millions de litres de bioéthanol ont été exportés vers l'Union européenne, principalement du Guatemala, du Pérou et du Pakistan. Le biodiesel quant à lui, provenait majoritairement de la Malaisie et du Brésil.

Le marché estimé français des biocarburants est de 2,5 milliards d'euros et il est concentré autour des biocarburants de 1^{ère} génération. Les emplois créés ou maintenus en France par cette filière sont de 6 400 emplois directs en 2011⁴. La consommation de la France et de l'Allemagne devrait augmenter dans les années à venir pour atteindre l'objectif de consommation d'énergies renouvelables des transports de l'UE. La part des biocarburants issus de terres en concurrence alimentaire sera néanmoins plafonnée à 7 % à l'horizon 2020, selon la directive (UE) 2015/1513 adoptée définitivement le 13 juillet 2015 et publiée le 9 septembre 2015⁵.

La France se prépare pour les nouvelles générations de biocarburants, avec en particulier le lancement des

1 – Source : European Biodiesel Board.

2 – Règlement d'exécution (UE) n° 443/2011 du Conseil du 5 mai 2011 : États-Unis.

3 – Règlement d'exécution (UE) n° 1194/2013 du Conseil du 19 novembre 2013 : Argentine et Indonésie.

4 – Source : ADEME.

5 – Source : http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2015.239.01.0001.01.FRA

projets BioTfuel, Syndièse, Gaya et Futurol, qui visent à produire du biodiesel ou du biométhane à partir de biomasse lignocellulosique. Par exemple, le programme BioTfuel a été lancé en 2010 pour 180 millions d'euros et son objectif est de développer et de mettre sur le marché d'ici 2020, une chaîne industrielle complète de procédés de conversion thermo-chimique de la biomasse en biogazole de synthèse. Les partenaires sont Axens, le CEA, IFP Énergies nouvelles, Avril (ex-Sofiprotéol), ThyssenKrupp Industrial Solutions et Total. Le pilote de Pomacle-Bazancourt du projet Futurol a produit 180 000 litres de biocarburant par voie biochimique. Les essais industriels sont en cours et la commercialisation du procédé a été lancée par le biais la société Axens. Ces différents projets devraient porter leurs innovations sur le marché dans les années à venir : dans un avenir relativement proche pour les projets les plus avancés (Futurol), à plus long terme pour les projets plus amont (Syndièse, Gaya).

Le gisement disponible en France pour la production de biocarburants de seconde génération serait compris entre 0,8 Mtep à 5 Mtep pour les produits forestiers et entre 3,3 Mtep et 3,4 Mtep pour les ressources agricoles⁶. Ainsi dans le cas d'un procédé BtL⁷ pour biodiesel et d'un rendement matière de l'installation de 15 %, le gisement en biodiesel serait compris entre 1,47 Mtep/an et 3 Mtep/an.

La production de biométhanol à partir de glycérine, sous-produit de la fabrication de biodiesel de 1^{ère} génération, est commercialement réalisée aux Pays-Bas pour une capacité de 200 kt/an et en Islande par combinaison de H₂ et du CO₂. D'autres projets de démonstrateur sont en cours et utilisent principalement des matières premières à bas coût tels que les déchets issus de la biomasse et des sous-produits pour diminuer les coûts de production. Le biométhanol peut également être produit à partir de biogaz de décharge ou de déchets organiques solides comme la bagasse.

L'hydrogène peut aussi être produit à partir de biogaz de décharge ou bien par reformage catalytique de polyalcools issus de la biomasse. La société française Solagro a ainsi développé en 2014 un prototype de production d'hydrogène. Cette filière est encore embryonnaire.

6 – Source : « Feuille de route biocarburants avancés », ADEME (2011).

7 – BtL : Biomass to Liquid.

Les défis technologiques à relever

Matières premières L'identification et/ou l'obtention de matières premières végétales possédant une meilleure concentration en glucides afin d'augmenter le taux de sucres fermentescibles permettra d'augmenter le rendement de production des biocarburants.

Procédés de broyage, de prétraitement et de saccharification L'étape de prétraitement de la biomasse permet de rendre les sucres complexes (cellulose, hémicelluloses) accessibles à l'étape d'hydrolyse et à celle de la fermentation, dans le cas de la voie biochimique. Il est nécessaire de concevoir des technologies de broyage, de prétraitement et de saccharification économiquement viables afin de libérer les sucres simples contenus dans ces glucides. Elles doivent répondre à des contraintes sur leur efficacité au niveau industriel et fournir un produit intermédiaire de qualité homogène tout en étant suffisamment flexibles pour fonctionner sur une grande variété de ressources.

Enzymes Les enzymes sont utilisées par la voie biochimique durant l'étape d'hydrolyse qui a pour rôle de fragmenter les molécules de cellulose en sucres fermentescibles. Leur coût est un des facteurs économiques limitant et doit par conséquent être optimisé.

Micro-organismes Ils sont employés durant l'étape de fermentation pour transformer les sucres issus de l'hydrolyse. Néanmoins, les sucres C5 libérés par la biomasse présentent un rendement de fermentation inférieur à ce qui peut être réalisé sur les sucres à six carbones (C6). Il est nécessaire d'identifier des micro-organismes possédant le patrimoine génétique permettant d'agir sur le plus grand nombre de sucres et ainsi d'améliorer la productivité.

Purification des gaz avant transformation en énergie La purification du gaz de synthèse (voie thermo-chimique) est cruciale pour l'obtention de carburants destinés aux transports. Il est néanmoins envisageable de le valoriser à un niveau moindre de pureté pour des applications industrielles (fours, chaudières).

Couplage des étapes Il consiste à regrouper des étapes dans le schéma d'intégration de la chaîne de procédé. Par exemple dans le cas de la voie biochimique, le couplage de l'hydrolyse enzymatique avec la fermentation, voire avec la production d'enzymes, peut être réalisé. Les coûts de production sont ainsi

diminués mais le rendement de production est réduit par rapport à une décomposition étape par étape. Des améliorations sont à apporter sur le couplage des étapes afin d'apporter un gain économique à la technologie.

Biométhanol Élément essentiel à l'industrie, il est majoritairement produit par reformage d'hydrocarbures fossiles. Sa production à partir de gaz de synthèse (voie thermo-chimique) ou bien de H₂ et CO₂ n'est pas, à de rares exceptions près, commercialement compétitive. Le développement des technologies associées doit être focalisé sur leur optimisation économique.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le coût de production est l'enjeu principal des carburants de synthèse. L'équation économique de leur adoption est aujourd'hui directement influencée par leurs concurrents principaux, les carburants d'origine fossile. L'instabilité conjoncturelle du prix de ces derniers a rendu délicat l'établissement de scénarii quant à l'adoption de cette technologie : l'évolution des prix durant ces dernières années est allée à contre-courant des prévisions initialement établies. Actuellement, seul le bioéthanol produit à partir de sucre de canne (filiale principalement développée au Brésil) serait en mesure de concurrencer l'essence d'origine fossile du seul point de vue des coûts : ils sont estimés entre 0,5 et 0,7 €/l (en équivalent essence), contre 0,7 à 0,9 €/l dans le cas du bioéthanol produit à partir de maïs aux États-Unis⁸. Dans le cas des biocarburants avancés, les estimations actuelles font apparaître des coûts de production prévisionnels – entre 1 et 1,4 €/l dans le cas du biodiesel⁹ – encore largement trop élevés. De fait, ces derniers ne pourront être économiquement viables que s'ils sont produits à partir de ressources à faible coût.

Selon une étude de la Direction générale du Trésor¹⁰, la prise en compte de la réduction des émissions de gaz à effet de serre ne permet pas de rendre les biocarburants compétitifs dans les conditions technico-économiques actuelles, qu'il s'agisse de biocarburants

conventionnels ou avancés. Pour ces derniers, le coût de la tonne de CO₂ (éq.) évitée serait de l'ordre de 200 € ; à titre de comparaison, la valeur « tutélaire » d'une tonne de CO₂ a été fixée à 100 € à l'horizon 2030¹¹. De ce point de vue, la réduction des coûts de production des biocarburants, en particulier ceux de nouvelle génération, apparaît comme un impératif majeur.

Les biocarburants de 1^{ère} génération sont handicapés par un déficit d'image en France et dans le monde du fait de la controverse sur la ressource employée pour les produire. Les nouvelles générations étant produites à partir de ressources non alimentaires, la question est dans ce cas moins sensible.

La concurrence internationale est intense, avec plusieurs projets de biocarburants avancés arrivant à maturité en Europe et des installations aux États-Unis déjà opérationnelles. C'est par exemple le cas avec l'unité de production d'éthanol cellulosique de Beta Renewables en Italie (2013, 40 kt/an) ou le projet de St1 Biofuels en Finlande (8 kt/an, produits à partir de sciure de bois).

Les enjeux réglementaires



En application de la directive européenne 2012/28/EU, la France a mis en place un plan national en faveur des énergies renouvelables à horizon 2020. Ainsi, les énergies renouvelables devront représenter 10 % de la consommation d'énergie des transports. Les biocarburants contribueront majoritairement à

8 – Source : IRENA

9 – Source : CEA – I-tésé.

10 – Source : Documents de travail de la DG Trésor, *Étude prospective sur la seconde génération de biocarburants*, septembre 2010.

11 – Source : Centre d'Analyse Stratégique.

l'atteinte de cet objectif et devront répondre à des critères de durabilité (prise en compte du contenu énergétique et carbone des biocarburants, des impacts liés au changement d'affectation des sols, concurrence avec la production alimentaire). Cette directive prévoit également que la part énergétique renouvelable des biocarburants issus de déchets, de résidus, de matières cellulosiques et lignocellulosiques qui n'entrent pas en concurrence avec les terres à vocation alimentaire peut être comptabilisée au double de sa valeur réelle pour le calcul de la part d'énergie renouvelable dans les transports. Cette mesure favorise les biocarburants avancés et la liste des matières premières éligibles a été publiée par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie en annexe de l'arrêté du 21 mars 2014. La directive 2009/28/CE est amendée en annexe IX par la directive (UE) 2015/1513 pour prendre en compte le changement indirect d'utilisation des terres (ILUC). L'annexe IX définit une liste

des matières premières pour biocarburants avancés comptant double dans le calcul des objectifs énergétiques. Les biocarburants avancés non répertoriés en annexe IX et utilisés dans des installations existantes avant l'adoption de cette directive peuvent être comptabilisés pour l'objectif national. La directive européenne relative à la qualité des carburants 2009/30/CE (FQD - Fuel Quality Directive) exige des fournisseurs de réduire de 6 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) pour le 31 décembre 2020 par rapport aux normes édictées sur les carburants fossiles en 2010. L'ajout de biocarburants dans les carburants fossiles permet d'améliorer le bilan CO₂, sachant que les installations mises en service à partir de 2018 devront démontrer que leur production permet une réduction de 60 % des émissions de gaz à effet de serre. Dans la pratique, le cadre réglementaire européen actuel favorise le biodiesel produit à partir de déchets tels que les huiles usagées ou les graisses animales.

Analyse AFOM

ATOUTS

Concentration des activités de R&D autour de quelques grands projets

Ressources agricoles et forestières

FAIBLESSES

Retard sur l'industrialisation par rapport à la concurrence internationale

Incertitudes sur les filières d'approvisionnement

OPPORTUNITÉS

Obligation réglementaire relative à l'incorporation de biocarburants, avec un « bonus » pour les biocarburants avancés

Synergies possibles avec les autres modes de valorisation (principe de la bioraffinerie)

MENACES

Incertitudes sur les évolutions du prix des carburants fossiles

Concurrence pour l'accès aux ressources

Facteurs clés de succès et recommandations

Les projets français sur les biocarburants avancés arrivent pour certains d'entre eux dans leur phase d'industrialisation et de commercialisation. Nécessitant des apports en capitaux importants, ces étapes sont critiques pour la construction de la filière française. Des mécanismes de soutien et d'incitation pour le financement d'unités de production à l'échelle pré-industrielle, avec, en parallèle, la poursuite des efforts de R&D visant à

améliorer les différentes briques technologiques – en particulier les briques « propriétaires » –, permettront de faciliter l'émergence de cette nouvelle filière. Il faut souligner que nombre de technologies développées dans ce cadre sont transversales et peuvent être valorisées pour d'autres applications, par exemple dans le domaine de la chimie verte. Les transferts entre projets doivent donc être favorisés.

Acteurs clés :

Entreprises	Abolis, AirLiquide, Arkema, Avril, Axens, Engie – CRIGEN, CIMV, Fonroche Energie, Global Bioenergies, Lesaffre, Tereos, Total...
Centres techniques	FCBA, CTP...
Instituts Carnot	3BCAR, Energies du Futur ICEEL, IFPEN TE, IRSTEA, M.I.N.E.S. ...
Autres centres de recherches	Centre Rapsodee des Mines d'Albi-Carmaux, Cirad, CRIGEN, IFPEN, INRA LBE, Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés (INSA Toulouse), LGC de l'Ensiacet, LISBP, LRGP, UCCS...
Pôles de compétitivité	Derbi, IAR, Tenerrdis...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Agro-Industrie Recherche et Développement...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale		Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership		En position de leadership	
Dans la moyenne	●	Dans la moyenne	●
En retard		En retard	

Loisirs
& culture

ÉNERGIE,
MOBILITÉ,
Numérique

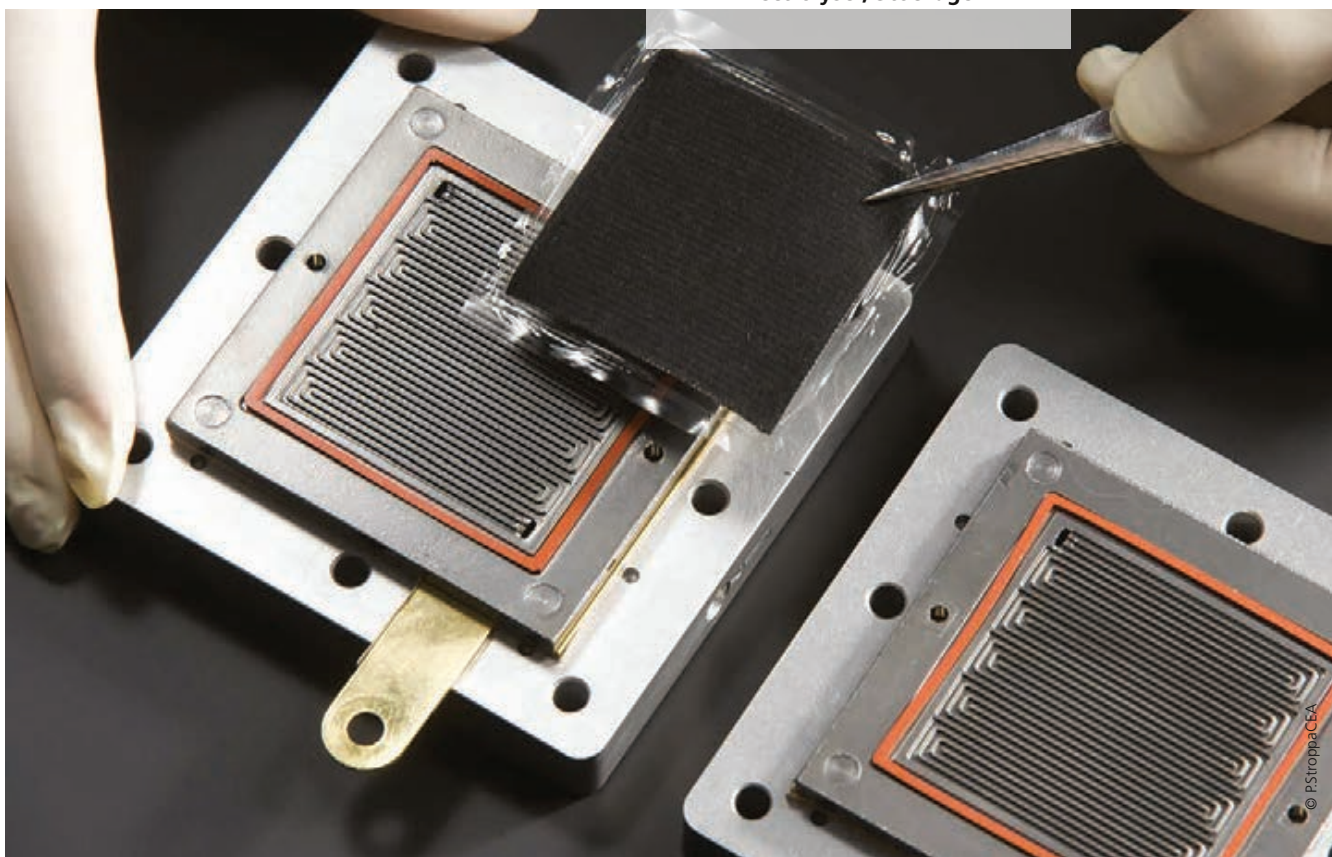
Environnement, Habitat,
Santé et bien-être, Sécurité

Alimentation

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Hydrogène ; Pile à combustible ;
Électrolyse ; Stockage.



Définition et périmètre

L'utilisation de l'hydrogène à des fins énergétiques implique de maîtriser l'ensemble des briques technologiques de la filière, partant de la production pour arriver aux modes d'utilisation et de valorisation, en passant par le transport, la logistique et le stockage.

La production de l'hydrogène est aujourd'hui majoritairement destinée aux utilisations industrielles. Elle utilise le procédé de reformage du gaz naturel, d'hydrocarbures liquides ou du charbon. Ce procédé présente l'inconvénient d'être fortement émissif en dioxyde de carbone (CO₂). Il est néanmoins possible de produire de l'hydrogène « décarboné » en utilisant des technologies alternatives : l'électrolyse basse température, encore limitée par son rendement limité et son coût (l'hydrogène ainsi produit pouvant être considéré comme décarboné à partir du moment où l'électrolyseur est alimenté par de l'électricité elle-même décarbonée) ; la gazéification de la biomasse, couplée à une purification et une séparation du gaz de synthèse ; l'électrolyse haute température-haute pression, encore expérimentale ; la dissociation thermochimique de l'eau, également expérimentale, et qui suppose de disposer d'une source de chaleur à haute température (plus de 850°C) et en grande quantité. Par ailleurs, la production d'hydrogène soit par photocatalyse, soit par des voies photobiologiques, soit par des voies biologiques, est aussi à considérer comme solution alternative.

La faible masse molaire de l'hydrogène, sa capacité à exploser, combinées à sa capacité de diffusion au travers d'un grand nombre de matériaux, posent des problèmes spécifiques à son stockage. Trois principaux modes de stockage peuvent être employés : sous forme gazeuse dans des conteneurs sous très haute pression ; sous forme liquide (stockage cryogénique) ; dans des matériaux solides sous forme d'hydrures métalliques.

L'hydrogène en tant que vecteur énergétique peut être utilisé de trois manières, s'agissant d'applications stationnaires : la production d'électricité et de chaleur via une pile à combustible, la méthanation, et enfin l'injection dans le réseau de gaz naturel.

La pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse, c'est-à-dire qu'elle produit de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène. Le produit direct de cette réaction est de la vapeur d'eau.

Une pile à combustible est composée d'une anode recevant l'hydrogène et d'une cathode recevant l'oxygène, l'ensemble étant séparé par un électrolyte qui va permettre le transport des charges. Les différents modèles et configurations de piles à combustible se distinguent par les matériaux employés au niveau des électrodes et de l'électrolyte. Pour des applications stationnaires, les principales configurations sont :

- PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), qui se caractérise par l'utilisation d'une membrane polymère comme électrolyte et qui fonctionne à 180-220°C ;
- SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*), dont l'électrolyte est en céramique (zircone) et qui fonctionne à 700-1000°C ;
- PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*) et MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*), dont l'électrolyte (respectivement l'acide phosphorique et des carbonates) est solide à température ambiante, mais liquide à la température de fonctionnement de la pile, c'est-à-dire 180-220°C pour le premier et 600-660°C pour le second.

Les chaleurs évacuées par le système peuvent être récupérées et valorisées (fonctionnement en cogénération). Comme pour la plupart des réactions chimiques, l'accélération de la cinétique est obtenue soit via une augmentation de la température, soit par l'utilisation d'un catalyseur, généralement du platine dans le cas présent. La haute température implique l'emploi de matériaux adaptés.

La méthanation consiste en la réaction de l'hydrogène avec du dioxyde ou du monoxyde de carbone dans un réacteur catalytique afin de produire du méthane.

L'injection directe dans le réseau de gaz existant consiste à alimenter ce dernier par un mélange hydrogène / gaz naturel.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

L'hydrogène présente plusieurs avantages en tant que vecteur énergétique. Flexible dans son utilisation et multi-secteurs, il peut être localisé auprès des utilisateurs finaux. Ces atouts peuvent lui permettre de servir de moyen de stockage de l'énergie produite par des ressources intermittentes que sont les éoliennes et le solaire photovoltaïque. En effet, ces dernières sont amenées à prendre une part de plus en plus importante dans le mix électrique français et mondial, et il

n'existe pas de technologies autorisant de gérer efficacement l'intermittence de la production lorsque cette part atteindra 30 % environ de ce mix. D'autres applications concernent sa combinaison avec du dioxyde de carbone (CO₂) – cas de figure plus spécifiquement intéressant lorsque le CO₂ est d'origine anthropogénique

– ou du monoxyde de carbone (CO) afin de produire du méthane de synthèse utilisable dans l'industrie ou les transports. Enfin, des véhicules à hydrogène commencent à voir le jour (Mirai pour le Japon, partenariat Renault-Nissan, Ford et Daimler sur le sujet, ainsi que des prototypes Air Liquide..)

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les technologies de l'hydrogène sont :

1 Matériaux avancés et actifs

Les technologies influencées par les technologies de l'hydrogène sont :

22 Réseaux électriques intelligents

24 Carburants de synthèse

45 Technologies pour la propulsion

Les marchés

Le marché de l'hydrogène peut être décomposé entre celui de l'industrie, celui de l'électricité stationnaire et celui de la mobilité. L'industrie, principal débouché depuis plusieurs décennies, utilise majoritairement le vaporeformage du méthane pour produire de l'hydrogène, l'électrolyse ne représente que 0,4 % des volumes annuels produits en 2013 au niveau mondial mais on estime que cette part atteindra 5 % en 2020. Le marché mondial de l'équipement pour la production d'hydrogène destiné à l'industrie est estimé à environ 150 millions d'euros en 2013 avec une perspective de croissance de 30 % par an pour atteindre 1 milliard d'euros en 2020¹.

Le marché mondial du « power to gas », composante de celui de l'électricité stationnaire, consiste à transformer l'électricité (produite en surplus ou issue de sources intermittentes) en hydrogène par le biais d'électrolyseurs à des fins de stockage d'énergie. Combiné à celui de la mobilité, ce marché naissant est d'environ 100 millions d'euros pour l'année 2013. Les perspectives de croissance le placent à 400 millions d'euros en 2020.

En 2013, le marché mondial des piles à combustible a atteint 975 millions d'euros de chiffre d'affaires, soit une augmentation de 35 % par rapport à 2012². Les acteurs clés du marché sont les États-Unis, le Japon, la Corée du Sud et l'Allemagne. En termes de puissance,

170 MW ont été commercialisés au niveau mondial en 2013. Le stationnaire domine très majoritairement le marché mondial avec 150 MW pour 30 000 systèmes et une augmentation de 24 % (en puissance) sur la période 2012 – 2013. Le marché mondial pour les transports est de 20 MW et 5 000 systèmes pour 2013. La production est largement dominée par le Japon avec 25 000 systèmes pour 2013 mais qui ne représentent qu'une puissance totale de 20 MW. Les États-Unis sont dans une situation inverse, avec seulement 2 500 systèmes qui représentent une puissance totale de 85 MW en 2013. La Corée du Sud occupe une position similaire à ce dernier avec 1 000 systèmes et une puissance totale de 45 MW en 2013. La production allemande est principalement constituée de systèmes de petite puissance (2 500 systèmes pour une puissance totale de 5 MW). Le Japon est le pionnier et le leader sur la commercialisation en termes de nombre de systèmes déployés. Le marché a émergé à partir de 2009 et est principalement constitué de modules stationnaires de micro-cogénération pour le résidentiel³.

En France, il n'y a pas encore de marché établi pour les piles à combustible et les applications de type « power to gas ». Le projet de démonstration GRHYD, situé à Dunkerque, regroupe une douzaine de partenaires dont Engie, Areva Hydrogène et stockage d'énergie, et McPhy. Il traite d'une part de l'injection d'hydrogène décarboné mélangé à du gaz naturel dans les réseaux existants de gaz et d'autre part de la distribution du

1 – Source : Freedonia – World Hydrogen – Juillet 2012.

2 – Source : Navigant Research.

3 – Source : Agence Internationale de l'Énergie, 2015.

carburant Hythane pour véhicule (mélange de gaz naturel et de 20 % d'hydrogène décarboné). Un autre projet est HyCUBE, situé en Corse, où de l'hydrogène est produit via un électrolyseur alimenté par une centrale solaire de 500 kW, puis stocké. Une pile à combustible est ensuite utilisée pour délivrer de l'électricité pendant les heures de forte consommation, à partir de l'hydrogène stocké.



S'agissant des applications en mobilité, le marché des véhicules équipés de pile à combustible est encore naissant. La voie privilégiée actuellement est le déploiement d'opérations de démonstration selon une logique de « corridors hydrogène », zones géographiques délimitées dans lesquelles l'infrastructure ad-hoc est déployée, permettant ainsi la mise en service de tels véhicules. L'approche française privilégie l'utilisation des véhicules électriques existants, dont on améliore l'autonomie par des prolongateurs à base de piles à hydrogène ; cela permet des usages plus intensifs, comme la livraison urbaine de colis.

Les défis technologiques à relever

Les défis technologiques actuels concernent l'optimisation des technologies existantes afin d'atteindre des coûts économiquement viables.

Électrolyse haute température Avec un rendement de 90 %, c'est la technologie de production d'hydrogène possédant le taux de conversion le plus élevé. Du fait de la haute température employée, elle demande des développements spécifiques sur les matériaux constituant l'équipement. Son utilisation en cycle

alterné SOFC/électrolyseur HT permettrait de combiner les deux modes dans un seul équipement. Les efforts de développement portent sur la mise à l'échelle de ce type d'équipement, encore au stade laboratoire, la durée de vie (dégradation du courant électrique), le coût de l'installation et son coût opérationnel, ainsi que sur la flexibilité d'utilisation (fonctionnement par intermittence dans le cas d'un couplage avec des énergies renouvelables).

Méthanation Le procédé consiste à transformer de l'électricité en méthane en utilisant d'une part de l'hydrogène produit par un électrolyseur alimenté par une source d'énergie renouvelable et d'autre part du dioxyde de carbone. Le méthane produit permet d'offrir une nouvelle solution de stockage d'énergie ainsi qu'une solution de valorisation du dioxyde de carbone. Le rendement de la réaction doit être amélioré, via notamment le développement de catalyseurs à hautes performances.

Technologies pour le stockage Il existe trois modes de stockage de l'hydrogène : par compression, par voie cryogénique et par voie solide. Le stockage solide (hydrures métalliques) présente un certain nombre d'atouts, comme le fait d'être réalisé à pression ambiante. Si ce mode de stockage est techniquement validé, il subsiste des marges d'amélioration. Le stockage sous pression (350 à 700 bar) semble être la technologie de référence mais des améliorations en termes de sécurité doivent être apportées afin de permettre une plus grande diffusion sur le marché.

Injection dans les réseaux de gaz naturel d'hydrogène Injecter de l'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables dans les réseaux de gaz naturel permet de gagner en flexibilité sur la production d'énergie, tout en évitant de recourir au stockage direct d'hydrogène. Il est néanmoins nécessaire de valider la compatibilité avec les équipements de réseau et le stockage souterrain de gaz, ainsi que la compatibilité au niveau des usages finaux (clients).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'hydrogène se trouve indirectement concurrencé par le développement de la production de gaz non conventionnels dans les applications de production

d'énergie. Les découvertes de tels gisements ont fortement modifié l'équation technico-économique : dans les conditions actuelles, l'hydrogène peut avant tout être envisagé à des fins de stockage.

Ainsi, l'hydrogène en tant que vecteur de valorisation de l'électricité provenant des énergies renouvelables présente des avantages en termes de capacité de stockage (quasi-illimité) et de flexibilité d'utilisation (possibilités d'intégration multiples) que ne possèdent pas d'autres technologies telles que le stockage par batterie.

Le coût des investissements initiaux élevés est la première barrière économique pour la commercialisation des piles à combustible. Les électrolyseurs sont des systèmes fortement modulables, et permettent à cette technologie d'être très flexible en termes de capacité. Toutefois, cet avantage technique limite les effets d'économie d'échelle même si les électrolyseurs de grande capacité emploient des empilements de tailles identiques. Enfin, le manque de standardisation entraîne également des difficultés dans l'organisation de la chaîne d'approvisionnement.

L'Amérique du Nord, le Japon et la Corée du Sud possèdent une avance technologique et commerciale importante dans le domaine des piles à combustible de type PEM. Néanmoins, le marché des autres technologies de piles (en particulier SOFC) ainsi que celui de l'électrolyse restent relativement plus ouverts.

Les enjeux réglementaires

L'hydrogène est utilisé depuis de nombreuses années à des fins industrielles (raffinage, chimie, métallurgie). Néanmoins, son utilisation en tant que vecteur énergétique hors industrie implique de nouveaux problèmes de sécurité sur son stockage. Dans le cas d'un conditionnement sous forme gazeuse, la forte pression nécessaire implique des risques d'éclatement du réservoir qui peuvent provoquer des surpressions aériennes et des projections de fragments. Lorsqu'il est stocké sous forme solide, la mise en contact accidentelle du composé adsorbant sous forme de poudre avec l'air, l'eau ou encore d'autres agents incompatibles peuvent entraîner des risques d'incendie violent. Pour aider le développement de la filière hydrogène, l'amélioration de la maîtrise des risques associés aux techniques de stockage doit conduire à la définition de règles de conception et des barrières de sécurité techniques, humaines et organisationnelles. Leur prise en compte dans une réglementation adaptée ou des normes de conception et de maîtrise des risques spécifiques participera au renforcement de la confiance dans l'hydrogène énergie de l'ensemble des participants de la chaîne de valeur⁴.

L'hydrogène est concerné par plusieurs réglementations françaises et européennes qui couvrent la production, le stockage et l'utilisation (transport de marchandises dangereuses et en environnement au sens réglementaire du terme). Plus particulièrement, la directive 2009/79/CE concerne les véhicules à moteur fonctionnant à l'hydrogène.

⁴ – Source : INERIS, *Veille technologique et évaluation des risques sur les procédés de stockage d'hydrogène*.

Analyse AFOM

ATOUTS

Présence d'un des leaders mondiaux
Maintien de l'activité en R&D
Projets fédérateurs (GRHYD, HyCUBE, etc.)

FAIBLESSES

Nombre relativement limité d'entreprises impliquées
Marché national actuellement limité à des niches
Modèles économiques encore fragiles

OPPORTUNITÉS

Dispositifs de soutien européen (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking)
Complémentarité avec le développement de l'électricité d'origine renouvelable

MENACES

Avance technologique et industrielle de la concurrence internationale sur les marchés actuels
Risques de rupture d'approvisionnement pour certains éléments critiques (catalyseurs)
Acceptabilité sociale

Facteurs clés de succès et recommandations

L'avance technologique prise par les États-Unis, le Canada, le Japon et la Corée du Sud dans le domaine des piles à combustible PEMFC est trop importante pour être comblée. Il importe de concentrer les efforts de recherche et développement sur les technologies émergentes, en particulier celles dites à « haute température » (qu'il s'agisse de piles ou d'électrolyseurs).

D'une manière générale, des investissements ciblés en recherche et développement pour les

applications stationnaires et leur intégration dans les systèmes énergétiques sont nécessaires pour positionner l'hydrogène de la façon la plus pertinente possible d'un point de vue technico-économique. L'utilisation des électrolyseurs en vue du stockage de l'énergie d'origine renouvelable nécessitera le développement de standards internationaux, particulièrement en ce qui concerne leur intégration au réseau électrique.

Acteurs clés :

Entreprises	AirLiquide, Areva Stockage d’Energie, Ataway, CETH2, Cofely Ineo, Electropôle - Schneider Electric, McPhy Energy, Michelin, Solumix, WH2...
Centres techniques	CETIAT...
Instituts Carnot	M.I.N.E.S., Energies du Futur...
Autres centres de recherches	CEA LITEN, CRIGEN, INERIS, IFPEN, GdR Hydrogène, Systèmes et Piles à Combustible, Université de Corse...
Pôles de compétitivité	Capenergies, Tenerrdis...

Les organismes signalés avec un astérisque sont également labellisés Carnot.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale		Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership		En position de leadership	
Dans la moyenne	●	Dans la moyenne	●
En retard		En retard	

26 Ingénierie génomique

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat,, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE , Sécurité
ALIMENTATION

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Matériel génétique – ADN – séquençage –
biologie moléculaire – physiologie cellulaire
– organismes génétiquement modifiés –
thérapie génique – sélection des variétés



© Franck Aguilu, IPMC CNRS

Définition et périmètre

L'ingénierie génomique correspond à la manipulation du matériel génétique du vivant¹. Reposant sur la biologie moléculaire et les technologies de séquençage du génome, elle permet d'identifier les gènes composant le matériel génétique d'une cellule ou d'un être vivant, d'étudier la relation génotype-phénotype, l'organisation, la stabilité et la variation du matériel génétique, et enfin de modifier le matériel génétique. Elle se trouve également à la base de la biologie de synthèse, visant à recomposer des systèmes variés, de la molécule à l'organisme à partir de l'étude du génome.

L'ingénierie génomique trouve des applications dans différents domaines, notamment l'alimentation, l'environnement et la santé.

Dans le secteur de l'alimentation, l'ingénierie génomique permet d'accélérer et d'optimiser la sélection des plantes, grâce à la sélection assistée par marqueurs, afin de conserver aux plantes les caractéristiques les mieux adaptées à leur milieu (résistance à la sécheresse, meilleur rendement, etc.) et d'améliorer leur utilisation agricole. En poussant plus loin le procédé, l'ingénierie génomique permet de modifier les caractéristiques d'êtres vivants, par exemple grâce à la transgénèse, qui consiste à introduire dans un organisme un gène étranger. Les plantes modifiées pourront alors développer de nouvelles caractéristiques, comme la résistance aux herbicides ou la capacité de synthétiser elles-mêmes des toxines insecticides, la résistance à la sécheresse ou à la salinité du sol, etc., réduisant ainsi les risques de pertes. Finalement, l'ingénierie génomique trouve des applications dans le secteur agroalimentaire, tant au niveau des tests de sécurité alimentaires et de la qualité des produits grâce aux techniques d'identification de micro-organismes ou de matériel génétique de pathogènes et contaminants, qu'en traçabilité.

Dans le secteur de l'énergie et de la chimie, l'ingénierie génomique des plantes et des micro-organismes soutient les avancées dans le domaine de la production de molécules et de produits de tout type, à partir de biomasse. Ces molécules peuvent entrer en substitution avec des molécules pétrochimiques existantes ou posséder des propriétés spécifiques propres. La connaissance et la modification du génome de cham-

pignons ou bactéries permettent d'optimiser certains procédés de production de ces molécules (éthanol pour le biocarburant, polyhydroxyalcanoates pour des applications plastiques biodégradables), voire de créer de nouvelles voies de production enzymatiques, par exemple à partir de chromosomes recréés par biologie de synthèse ou édition de génome. L'ingénierie métabolique a également donné de nombreux développements industriels en biotechnologies blanches pour accéder à des intermédiaires chimiques variés et des polymères (acide lactique de Cargill permettant de fabriquer le polymère plastique acide polylactique (PLA), ou 1,3 propane-diol (PDO) de la start-up française Metabolic Explorer utilisé par exemple pour produire le polymère polytriméthylène terephthalate).

L'ingénierie génomique peut également contribuer à des plans de protection des eaux, des sols et de l'air. Elle apporte des solutions soit pour la surveillance et l'analyse de l'environnement, par exemple pour l'identification des organismes parasites et pathogènes ou l'étude des pollutions émises par les complexes industriels, soit pour la biodépollution grâce à l'action de microorganismes modifiés.

Dans le secteur de la santé, les avancées en ingénierie génomique permettent notamment le développement de la thérapie génique. Elle consiste à traiter une maladie génétique, par exemple en désactivant un gène muté dysfonctionnel, ou en le remplaçant par une copie saine de ce gène. Dans le domaine de la bioproduction, la modification du génome de certaines espèces microbiennes, voire animales, permet également de produire des biothérapies. En outre, les techniques d'édition du génome permettent de créer des modèles animaux porteurs de maladies et de soutenir les avancées dans l'étude des mécanismes pathogéniques chez l'homme.

Enfin, l'ingénierie génomique est porteuse de services à très haute valeur ajoutée pour les utilisateurs de biotechnologies, notamment au travers du séquençage du génome basé sur les nouvelles générations de séquenceurs.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

L'ingénierie génomique ouvre sur de nombreux marchés d'application dynamiques, notamment dans les secteurs de l'alimentation, de la santé et de

¹ – Les technologies associées à l'étude de l'expression des gènes (transcriptomique, protéomique, métabolomique) sont traitées dans la fiche « Métaomique »

l'environnement, dans laquelle la France a le potentiel d'asseoir une position stratégique. Les acteurs français sont notamment bien positionnés dans le secteur de la santé, grâce à une force de recherche, des instituts (CNRS, Généthon, Institut Pasteur, Transgene) et des entreprises (Collectis, Clean Cells) de renommée internationale. Les applications en médecine préventive et médecine régénérative donnent lieu à la création de spin-off et de projets industriels prometteurs (par exemple Sanofi, Cellprothera, Theravectys), qui commencent à développer une filière française de la médecine de demain. A plus long terme, les méthodes de séquençage rapide permettront d'ouvrir les portes vers le diagnostic exhaustif et rapide, la médecine prédictive modifiant profondément les pratiques dans le domaine de la santé. La protection de l'environnement, la sécurité alimentaire, la surveillance des épidémies ou d'actes malveillants bénéficiera aussi des progrès du séquençage.

L'ingénierie génomique peut par ailleurs fournir des réponses à des défis mondiaux de sécurité alimentaire tout en respectant les contraintes environnementales fixées par le concert international. Elle peut par exemple permettre d'adapter des plantes à des milieux inhospitaliers afin d'accroître les réserves alimentaires, et d'en améliorer la qualité nutritive. Elle permet également d'augmenter les rendements sans recours intensif aux intrants.

Elle répond enfin directement à des enjeux environnementaux, en apportant des alternatives au « tout pétrole », notamment à travers des enzymes capables de transformer la biomasse en un grand nombre de molécules trouvant des intérêts en chimie verte ou dans le domaine des biocarburants.

En santé, la thérapie génique nourrit des espoirs thérapeutiques pour un large nombre de pathologies, notamment pour les cancers et les maladies génétiques rares (ce dernier groupe affecte 3 à 4 millions de personnes en France)². La plupart des maladies qu'elle concerne sont de plus des maladies graves et incurables pour lesquelles il n'existe pas d'autre solution thérapeutique. Les avancées technologiques rendues possibles par les travaux de recherche menés sur ces maladies devraient également bénéficier à d'autres groupes de maladie à fortes prévalences.

2 – www.sante.gouv.fr

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Capteurs** : l'ingénierie génomique est le premier pas vers la conception de capteurs biologiques, qui peuvent être utilisés en santé ou pour des mesures de pollution, de contrôle qualité, etc. ;

■ **Imagerie pour la santé** : l'ingénierie génomique peut intervenir dans la conception et le développement de biomarqueurs, outil essentiel de l'imagerie pour la santé ;

■ **Fabrication additive** : l'ingénierie génomique ouvre les portes vers l'ingénierie tissulaire et à plus long terme vers la reconstitution de tissus biologiques, permettant la fabrication par multicouches de cellules de denrées alimentaires, voire même d'organes artificiels ;

■ **Ingénierie cellulaire et tissulaire** : l'ingénierie génomique est un outil pour la modification de cellules dans le cadre de l'ingénierie cellulaire et tissulaire ;

■ **Immunothérapie** : l'ingénierie génomique, en permettant de sélectionner et de modifier des cellules, peut contribuer à la création de nouvelles générations de cellules pour l'immunothérapie ;

■ **Métabomique** : le séquençage d'ADN est un des outils de base de la génomique, l'un des piliers de la métabomique ;

■ **Solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux** : l'ingénierie génomique permet de sélectionner et de privilégier les caractéristiques des végétaux leur permettant de résister aux ravageurs, maladies et aux environnements inhospitaliers ;

■ **Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition** : le développement de souches de probiotiques est une application directe de l'ingénierie génomique, dans la mesure où ces souches sont sélectionnées et certaines caractéristiques favorisées pour leurs applications industrielles ;

■ **Valorisation et intelligence des données massives** : ces technologies facilitent l'interprétation des données en très grande quantité générées par l'ingénierie génomique et notamment le séquençage du génome ;

■ **Carburants de synthèse et Procédés relatifs à la chimie verte** : l'ingénierie génomique permet d'améliorer génétiquement certains microorganismes afin d'optimiser les processus de transformation de la biomasse.

Les marchés

Les principaux marchés liés à l'ingénierie génomique sont globalement dynamiques et en croissance. En amont, le marché mondial du séquençage du génome est estimé à 2,16 Mds € en 2011, et une très forte croissance est attendue au cours des 5 prochaines années, le marché devant atteindre 8,5 Mds € en 2018³.

Dans le secteur de l'alimentation, le volume du marché des cultures génétiquement modifiées est en constante augmentation. Les surfaces cultivées en OGM représentent, en 2014, 181,5 M ha, soit 11 % de la surface cultivée de la terre, contre environ 1,7 M ha en 1996⁴. Les cultures génétiquement modifiées sont principalement le coton, le soja, le maïs et le colza. Un seul OGM est actuellement cultivé en Europe, le maïs MON810 du groupe américain Monsanto, presque exclusivement planté en Espagne et au Portugal. La France, ainsi que 18 autres pays de l'Union Européenne, reste opposée à la culture d'OGM sur son territoire.

Concernant les biocarburants, l'Union Européenne affiche l'objectif ambitieux d'élever à 20 % la part des énergies renouvelables dans sa consommation finale d'énergie en 2020 (en 2005, la moyenne était de 7 %)⁵. La part des biocarburants dans la demande en carburants liquides pour le transport au sein de l'U.E. est déjà passée de 0,2 % en 2000 à 4,5 % en 2013⁶. Pour atteindre les objectifs à horizon 2020, une contribution plus importante de la biomasse sera nécessaire : l'ingénierie génomique permet d'optimiser la production de biocarburants de 2^e génération à partir de biomasse grâce à des microorganismes modifiés. La France devra par exemple mobiliser près de 10 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) de biomasse supplémentaires.

Le secteur de la surveillance et de l'analyse de l'environnement représentait un marché mondial de 26,6 Mds € en 2010 et devrait connaître une croissance forte d'environ 10 % par an dans les 10 prochaines années⁷. En France, les dépenses nationales liées aux réseaux de

mesure et de surveillance des sols et eaux s'élevaient à 84 M€ en 2010⁸. La majorité du marché repose toutefois sur les méthodes d'analyse chimique (recherche de métaux lourds), et la recherche de contaminants biologiques, qui pourrait faire appel à des techniques d'ingénierie génomique, est plus confidentielle.

Le marché de la thérapie génique est également dynamique⁹. En 2014, plus de 1800 essais cliniques étaient en cours dans le monde, dont 65 % concernent le cancer et 10 % les maladies monogéniques,¹⁰ ce qui souligne l'importance grandissante du cancer comme cible des thérapies géniques. Les essais ont beaucoup évolué au cours de ces dernières années avec notamment le passage de l'animal à l'homme, ce qui constitue une étape importante et prometteuse pour le développement du marché de la thérapie génique. En France, 9 essais cliniques de thérapie génique sur l'homme ont ainsi été autorisés en 2013¹¹, et en 2012 la Commission Européenne a approuvé pour la première fois la commercialisation d'un produit de thérapie génique, le Glybera® de la société néerlandaise uniQure. Aucun produit de thérapie génique n'a encore été approuvé par la Food and Drug Administration (FDA) mais pour plusieurs autres molécules, les essais s'achèvent ou les demandes d'autorisation sont en cours. Encore dans une phase précoce de développement, le marché mondial de la thérapie génique est estimé à 500 M\$ en 2020¹².

Enfin, sur le marché de la bioproduction, la France est un marché dynamique avec 40 sites de production en 2013, dont les derniers ont été créés au cours des dernières années, sur les 744 sites mondiaux existants. 350 PME nationales sont positionnées sur ce marché, qui compte 13 000 emplois en France, et la demande en biomédicaments est passée de 5 à 15 % entre 2000 et 2012¹³.

Les défis technologiques à relever

En dépit des avancées technologiques rapides, des verrous subsistent. Dans le domaine du séquençage, la lenteur et le coût du processus ont limité les

3 – Marketsandmarkets

4 – ISAAA

5 – Ademe, « Synthèse. Feuille de route biocarburants avancés », 2011

6 – Inra, 2013

7 – Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, Marché mondial de l'environnement et perspectives pour les éco-entreprises françaises, 2010

8 – SOeS, « L'économie de l'environnement en 2012, édition 2014 »

9 – Concernant la thérapie cellulaire, se référer à la fiche « Ingénierie tissulaire et cellulaire »

10 – Inserm

11 – ANSM

12 – Research and Markets

13 – LEEM, 2014

premières générations de séquenceurs à un screening par espèce ; les nouvelles générations tendent vers un processus plus rapide (screening haut débit) et moins coûteux, permettant des approches de séquençage par individu. Le traitement préalable de l'échantillon à analyser est un défi complémentaire à celui de la technologie de séquençage elle-même.

Dans le domaine de la transgénèse, l'insertion du gène n'est pas encore complètement maîtrisée. Une meilleure connaissance des voies d'insertion des vecteurs et de la localisation dans le génome du gène introduit est indispensable. Le transfert de gènes doit également être assuré de manière sûre et efficace et garantir la stabilité de l'expression du gène introduit. Par ailleurs, la transgénèse est majoritairement réalisée aujourd'hui de manière aléatoire, et les nouvelles générations de séquenceurs constituent des outils précieux pour cela. L'enjeu est maintenant de cibler des modifications très précises, ainsi que de développer des services de caractérisation de l'impact et du contrôle qualité de ces interventions sur le génome.

Dans le domaine de l'environnement et de l'énergie, les défis à relever consistent à optimiser les micro-organismes pour parvenir à lever les derniers verrous technologiques et atteindre des rendements permettant l'industrialisation des processus, et ainsi à développer les opportunités offertes par la biomasse. En particulier, ces avancées devraient permettre l'utilisation de ressources non alimentaires (parties non comestibles des plantes, ligno-cellulose, déchets, ...), limitant ainsi les conflits d'usage.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

De manière générale, la France doit faire face à une forte concurrence de pays comme la Chine et les États-Unis, notamment sur l'offre de services en ingénierie génomique. La consolidation et la protection des portefeuilles de brevets est clé pour conserver la position des acteurs français dans ce domaine.

Pour les petites entreprises, le défi commercial consiste à se positionner sur la chaîne de valeur de l'ingénierie génomique. Si le segment de l'instrumentation, déjà saturé par des leaders étrangers, est difficilement accessible à des PME, la sous-traitance de certaines étapes de la chaîne constitue en revanche une opportunité. En effet, des PME positionnées en chimie ou

biochimie, en microfluidique, en imagerie, en bioinformatique, peuvent se diversifier dans l'ingénierie génomique en proposant des services ou des produits sur une étape précise du processus.

Par ailleurs, certains marchés internationaux et notamment celui des États-Unis peuvent être plus prometteurs à court terme, notamment dans le domaine de la santé. En effet, la question du système de paiement des frais est cruciale pour les acteurs de l'ingénierie génomique développant une démarche préventive, voire prédictive. Dans un système faisant porter la charge des frais de santé aux particuliers, comme aux États-Unis, des technologies permettant de réduire les coûts sur le long terme sont attractives. La question du circuit de remboursement des frais de santé doit ainsi être prise en compte par les entreprises se positionnant sur ce segment.

Les enjeux réglementaires

Le principal enjeu réglementaire dans le domaine de l'ingénierie génomique est lié au problème d'acceptabilité sociétale que soulèvent ces technologies. Le public français adopte une position conservatrice vis-à-vis des avancées dans ce domaine, notamment en raison de préoccupations éthiques, ainsi que de craintes pour la sécurité sanitaire des aliments et la sécurité de l'environnement.

La récente réforme de l'Union Européenne concernant l'autorisation de la culture d'OGM sur le territoire de ses pays membres tente de débloquent ce dossier. La Commission Européenne a autorisé le 24 avril 2015 l'importation et la commercialisation de 17 OGM, destinés à l'alimentation humaine et animale. Une réforme de la législation réserve aux États membres la possibilité d'interdire l'utilisation de ces organismes sur son territoire.

Dans le domaine de la santé, l'acceptabilité est plus facile du fait notamment des visées thérapeutiques prometteuses. Les barrières éthiques et morales demeurent malgré tout très présentes en ce qui concerne la manipulation du génome humain. Les craintes de dérives eugéniques sont ainsi régulièrement citées même si la loi de bioéthique du 29 Juillet 2009 précise que toute pratique eugénique tendant à l'organisation de la sélection des personnes est interdite : La modification du génome des cellules germinales est dans ce but strictement interdite, même dans le cadre de recherche thérapeutique¹⁴.

14 – www.assemblee-nationale.fr

Analyse AFOM

ATOUTS

Compétences françaises importantes (recherche et industriels) de niveau international

Développement de portefeuilles de brevets

FAIBLESSES

Pas de leaders français sur le marché de l'instrumentation du séquençage

Certains marchés applicatifs sont trop peu développés (cultures OGM, biocarburants), poussant certains acteurs français à réaliser leur développement hors Union Européenne

OPPORTUNITÉS

Très nombreuses applications possibles

Dynamisme du secteur et développement constant de techniques innovantes

Évolution de la réglementation européenne sur l'autorisation de cultures OGM

Résultats positifs de plusieurs essais cliniques

MENACES

Problème d'acceptabilité sociétale et restrictions réglementaires, notamment sur la recherche sur les cellules souches embryonnaires et la présence d'OGM dans les produits alimentaires

Forte concurrence internationale

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

- Pour les PME dans le domaine de l'ingénierie génomique, notamment sur les secteurs de la santé et de l'alimentation, projeter un développement sur les marchés internationaux ;
- Recherche les opportunités de se positionner en sous-traitance sur l'ingénierie génomique, sur une étape de la chaîne de valeur, en proposant des produits ou services, notamment pour des PME positionnées en chimie, biochimie, microfluidique, bioinformatique, etc.

Concernant les pouvoirs publics :

- Concilier pour certaines applications, notamment l'amélioration d'espèces et de variétés, le maintien de la compétitivité de la France sur l'ingénierie gé-

nomique avec les préoccupations éthiques et sociétales liées à la modification d'organismes vivants ;

- Indépendamment des questions sociétales et éthiques, il est important de soutenir pour des raisons de compétitivité la politique de brevets des sociétés françaises ;
- Identifier et soutenir le développement des « pépites » françaises existantes dans le domaine de l'ingénierie génomique afin de favoriser leur rayonnement à l'international, en privilégiant le maintien des entreprises sur le territoire français malgré l'éventuelle prise de participation de capital étranger ;
- Soutenir les développements en bio-informatique et la mise en place de formations permettant de développer le potentiel humain (en bio-informatique et en bio-production).

Acteurs clés

Organismes de recherche

Des compétences françaises de recherche sur l'ingénierie génomique sont rassemblées aussi bien dans des EPST¹⁵ tels que **l'Inserm, le CNRS, le CEA et l'INRA**, que dans des structures physiques telles que **l'Institut Pasteur, l'Institut Curie, l'Institut de Génétique et de Biologie Moléculaire et Cellulaire (IGBMC)...** **L'Hôpital Necker** et le **Généthon** sont les spécialistes français de la thérapie génique, ce dernier étant un organisme de recherche translationnelle visant à accélérer la mise en application médicale des résultats scientifiques issus de la recherche fondamentale sur les thérapies géniques. Enfin, **France Génomique** est une infrastructure nationale rassemblant les plateformes opérationnelles en génomique, telles que la plateforme MGX à Montpellier.

Start-up et PME

De nombreuses start-up et PME sont positionnées à différents niveaux de la chaîne de valeur de l'ingénierie génomique et sur différents secteurs. Plusieurs d'entre elles sont positionnées en santé, telles que **Collectis**, qui a développé des outils moléculaires permettant de reprogrammer précisément et à la demande le génome de tout organisme vivant ainsi que des immunothérapies fondées sur des cellules T ingénierées, mais également **Clean Cells, In-Cell-Art, IntegraGen, Hybrigenics, LFB Biomanufacturing, Transgene (BioMérieux), Cellprothera** ou

encore **Theravectys**. D'autres sociétés proposent des services d'analyse d'organismes ou de la qualité de produits, telles que **Genosafe** et **Genoscreen**, ou des analyses environnementales comme **Watchfrog**. D'autres sociétés enfin sont positionnées sur la production de biocarburants, telles que **Global Bioénergies, METabolic Explorer** ou **Deinove**.

Grands groupes

La France est absente du segment de l'instrumentation en ingénierie génomique. En revanche, les technologies d'ingénierie génomique sont utilisées et maîtrisées par de très nombreux groupes français d'envergure internationales sur différents secteurs : en santé (**Sanofi, Servier**, etc.), en agroalimentaire (**Limagrain, Lesaffre**, etc.), dans le domaine des biocarburants (**Tereos, Cristal Union, CIMV**, etc.) ou plus en amont des acteurs spécialisés dans l'analyse tels qu'**Eurofins**.

Écosystème de l'innovation

Les entreprises de l'ingénierie génomique sont soutenues par de nombreux pôles de compétitivité, dont **Alsace BioValley, Medicen, Lyonbiopôle, CBS, Céréales Vallée, Axelera**, et **IAR**, ainsi que par des Instituts Carnots et instituts spécialisés sur certaines pathologies, tels que les **Carnot LISA** (Lipides pour l'Industrie et la Santé), **CED2, Institut du cerveau et de la moëlle épinière (ICM), Voir et Entendre, Curie-Cancer** et **Pasteur Maladies Infectieuses**. Le **Génopole d'Evry**, centre de recherche et de développement en génomique, héberge également des start-ups positionnées sur ce secteur.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

15 – Établissements Publics à caractère Scientifique et Technologique

27

Solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux

Loisirs
& culture

Énergie,
Mobilité,
Numérique

Environnement, Habitat,,
Santé et bien-être, Sécurité

ALIMENTATION

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

**Phytoprotection, biocontrôle,
défenses naturelles des plantes**



© Phovoir.fr

Définition et périmètre

Le modèle conventionnel de protection et de stimulation de défense ou de croissance des végétaux s'appuie sur l'agrochimie, qui apporte, à un problème donné affectant les cultures, une solution à haut degré d'efficacité mais dont les impacts sur l'environnement sont de plus en plus prégnants : produits phytosanitaires et engrais de synthèse. Afin de répondre à des enjeux de réduction des intrants dans le secteur agricole, de nouvelles approches se développent en combinaison avec les approches conventionnelles, afin de réduire la pression des bio-agresseurs, de renforcer les résistances des plantes ou de stimuler leur croissance. Au niveau de la plante elle-même, il peut s'agir de combinaisons des produits de synthèse conventionnels avec des produits de biocontrôle des ravageurs et maladies, de modification du génome des plantes afin de leur conférer des propriétés les rendant plus résistantes ou mieux adaptées à leur environnement, ou des procédés innovants de stimulation des défenses naturelles des plantes. Si ces nouvelles solutions de protection et de stimulation des végétaux ne remplacent pas complètement les solutions conventionnelles, elles leur sont complémentaires et permettent une approche raisonnée de gestion des cultures.

Les produits de biocontrôle sont des agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent en particulier :

- Les macro-organismes ;
- Les produits phytopharmaceutiques comprenant des micro-organismes, des médiateurs chimiques comme les phéromones et les kairomones, ainsi que des substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale¹.

Leur action peut se concentrer sur les bio-agresseurs, directement ou indirectement, ou sur la plante elle-même, pour stimuler ses défenses naturelles. Les Stimulateurs de Défenses des Plantes (SDP) ou éliciteurs sont des molécules reconnues par la plante comme le signal d'une agression, et qui induisent une résistance accrue de la plante à cette agression.

La modification du génome des plantes afin d'augmenter leur résistance aux bio-agresseurs ou à des

1 – Article L253-6 du Code rural et de la pêche maritime

conditions difficiles fait partie de ces approches innovantes permettant de réduire le recours aux produits phytosanitaires de synthèse².

Concernant la stimulation des plantes, de nouvelles approches se développent également, via notamment les biostimulants. Il s'agit de matériels dont la fonction est de stimuler les processus naturels des plantes pour améliorer l'absorption des nutriments, leur efficacité, la tolérance aux stress abiotiques, et la qualité des cultures³.

Par ailleurs, des outils et techniques agronomiques prophylactiques, s'appliquant aux systèmes de culture et facilitant la gestion et la croissance des plantes se développent également : outils moléculaires de diagnostic, indicateurs précoces de présence de ravageurs, imagerie pour analyse non destructive des végétaux, surveillance du stress hydrique grâce à des drones, rotation des cultures, étouffement des mauvaises herbes⁴...

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Face à une demande de produits agricoles toujours en hausse en raison de l'augmentation démographique mondiale, l'agriculture repousse ses limites grâce à des modèles de cultures intensifs et un recours important aux intrants. Les ressources (terres agricoles, eau) sont cependant finies et les impacts négatifs de ces modèles sur l'environnement et les populations imposent à long terme la recherche de nouveaux moyens pour l'agriculture. De nouveaux outils de protection et de stimulation des végétaux permettent de répondre à ces enjeux, en proposant des solutions alternatives s'inscrivant dans une approche de réduction des risques pour la santé humaine, l'environnement et les ressources agricoles tout en préservant les rendements. Le marché des solutions innovantes de protection et de stimulation des végétaux est en plein essor et renferme des perspectives de développement intéressantes au niveau mondial, aussi bien dans les pays développés pour améliorer les systèmes existants, que dans les pays en développement afin de favoriser de meilleurs rendements dans le secteur agricole.

2 – Cf. fiche « Ingénierie génomique »

3 – Définition de l'*European Biostimulants Industry Council (EBIC)*, 2014

4 – Cf. Fiche « Capteurs » pour plus de détails

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Capteurs** : En parallèle de solutions de biocontrôle et de SDP, les capteurs mesurant les paramètres météorologiques, les paramètres physiques ou chimiques du sol, les paramètres architecturaux ou biochimiques de la plante, l'état hydrique, etc., sont des outils innovants pour la protection et la stimulation des végétaux.

■ **Ingénierie génomique** : L'ingénierie génomique permet d'étudier les relations génotype-phénotype de plantes, et de sélectionner et privilégier les caractéristiques des végétaux leur permettant de mieux résister aux ravageurs, maladies et aux environnements inhospitaliers.

■ **Métaomique** : les technologies de la métaomique permettent d'étudier les mécanismes de défense et de croissance des plantes, ainsi que l'impact de l'environnement sur ceux-ci, et également d'identifier les molécules ou organismes stimulateurs.

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique** : Les techniques de modélisation et de simulation permettent d'anticiper les réactions des plantes aux solutions de protection ou de stimulation qui leur sont appliquées, d'optimiser le procédé de conception de ces solutions et de les tester à grande échelle en champ.

■ **Valorisation et intelligence des données massives** : l'étude des caractéristiques des plantes, de la relation génotype-phénotype et des paramètres intervenant dans leur croissance génère des quantités massives de données, que ces technologies aident à traiter.

Les marchés

Le marché du biocontrôle en général, s'il ne représente que de faibles volumes vis-à-vis du marché conventionnel de la phytoprotection, est en croissance rapide. Le marché mondial est estimé à environ 1,6 Mds€ et le marché européen à 550 M€ en 2013 ; le marché français représente 100 M€, soit 5 % du marché de la protection phytosanitaire, et sa croissance annuelle est de l'ordre de 15 à 20 %⁵. Plus de 70 PME et grands groupes sont positionnés en France sur ce marché, les grands groupes tendant à racheter les petits entreprises pionnières du biocontrôle (Lesaffre, Lallemand Plant Care).

5 – IBMA, 2014 : *Rapport global sur le marché du biocontrôle*

Le marché des SDP est encore embryonnaire. En effet, la procédure d'homologation lourde et coûteuse bloque la mise sur le marché de produits dont le développement technique est par ailleurs complexe. De plus, les acteurs positionnés sur ce marché sont principalement des PME (Goëmar, Agrolor, Biophytech en France, GlycoGenesis ou Eden Biosciences aux USA) ce qui limite les possibilités d'investissement. Seuls quelques produits SDP *stricto sensu* sont commercialisés aujourd'hui en France, comme par exemple le *Bacillus subtilis QST 713* (bactérie), le *trichoderma harzianum* (champignon) ou la *laminarine* (extrait purifié d'algues)⁶.

Le marché mondial des biostimulants est estimé à environ 1 Mds€ en 2013, soit 0,6 % du marché mondial des intrants utilisés en production végétale (150 Mds€)³. En Europe, le marché des biostimulants est estimé par l'EBIC à environ 500 millions d'euros. Sa croissance devrait rester supérieure à 10 % dans les prochaines années, et il devrait atteindre 800 M€ en Europe en 2018.⁷

Les défis technologiques à relever

Le développement de nouvelles solutions de protection et de stimulation des végétaux passe par la compréhension des processus complexes de croissance des plantes et de leurs interactions multiples avec leur environnement. Les connaissances doivent être approfondies afin d'affiner les modes d'action des nouveaux produits, préparés aujourd'hui empiriquement, et d'anticiper tous les effets possibles sur l'écosystème des plantes.

Dans le domaine du biocontrôle, le passage du laboratoire au champ est encore aléatoire pour de nombreux produits. La transposition sur grandes cultures des résultats obtenus sur des plantes modèles, en conditions contrôlées, est complexe. Les performances des solutions sont encore très irrégulières, la durabilité de leur activité et leur toxicité éventuelle sont encore mal maîtrisées, ce qui constitue un frein important à leur adoption par les agriculteurs. Finalement, leur utilisation conjointe à celle de produits conventionnels de protection doit être mieux explorée afin d'optimiser leurs effets combinés.

6 – MAAF, 2014 : *Produits de stimulation en agriculture visant à améliorer les fonctionnalités biologiques des sols et des plantes – Étude des connaissances disponibles et recommandations stratégiques*

7 – Données de l'European Biostimulants Industry Council (EBIC)



Dans le domaine des cultures génétiquement modifiées, des verrous technologiques subsistent notamment dans la maîtrise de la transgénèse et dans la garantie de la stabilité du gène introduit⁸.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le premier défi consiste à augmenter la palette de produits disponibles. Très peu de solutions de type stimulateurs de défense des plantes ou biostimulants sont aujourd'hui homologuées, en particulier pour les grandes cultures.

Par ailleurs, les solutions innovantes de protection et stimulation des végétaux comportent un enjeu crucial d'accompagnement et de sensibilisation des agriculteurs à de nouvelles approches, en combinaison avec les produits conventionnels. La clarification de leur mode d'utilisation, plus complexe que celui des produits phytosanitaires conventionnels, est clé pour assurer leur efficacité. Le coût de ces solutions, souvent supérieur à celui des solutions conventionnelles, constitue également un frein important à leur adoption.

En outre, la chaîne de distribution doit être optimisée et intégrée entre distributeurs et utilisateurs, certaines solutions présentant des contraintes de temps importantes, comme par exemple les délais d'éclosion des œufs d'insectes utilisés comme auxiliaires pour la lutte contre les ravageurs.

8 – Cf. Fiche « Ingénierie génomique »

Enfin, la transition vers un modèle de biocontrôle, plus préventif et intégrant de multiples paramètres de l'écosystème de cultures, peut comporter des coûts associés à l'incertitude du dosage ou de la planification de ces traitements, qui sont lourds à porter pour les agriculteurs.

Concernant les plantes génétiquement modifiées, l'acceptation sociétale de cette solution représente un défi majeur en France¹.

Les enjeux réglementaires

La directive européenne 2009/128/CE oblige les États membres à adopter les plans d'action nationaux en vue de réduire les risques et les effets de l'utilisation des pesticides sur la santé humaine et l'environnement. Elle vise également à encourager l'élaboration et l'introduction de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et de méthodes ou de techniques de substitution en vue de réduire la dépendance à l'égard de l'utilisation des pesticides.

Le plan Ecophyto en est la déclinaison française. Dans ce cadre, le développement de nouvelles solutions de protection et stimulation des végétaux apporte des réponses aux enjeux de réduction des intrants en agriculture.

Cependant, les produits de biocontrôle et de stimulation de défenses des plantes sont soumis à la même réglementation que les produits phytosanitaires (Règlement CE n°1107/2009), et doivent bénéficier d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) pour un usage précis. De même, les biostimulants doivent bénéficier d'une autorisation de mise sur le marché, conformément aux articles L255-1 et suivants du Code rural et de la pêche maritime sur la mise sur le marché et l'utilisation des matières fertilisantes, de leurs adjuvants et des supports de culture. L'efficacité de ces solutions étant moindre et moins régulière que celle des produits conventionnels, la procédure d'homologation, qu'elle concerne les produits phytopharmaceutiques ou les matières fertilisantes, est souvent lourde et coûteuse. L'ordonnance 2015-615 du 4 juin 2015 relative à la mise sur le marché et à l'utilisation des matières fertilisantes, des adjuvants pour matières fertilisantes et des supports de culture a déjà modifié l'article L253-1 du Code rural et de la pêche maritime pour tenir compte de ces nouveaux produits et de leur spécificité; cependant, le renforcement d'une réglementation plus adaptée à la

spécificité des produits de biocontrôle, des solutions de stimulation de défense des plantes et des biostimulants est nécessaire pour favoriser le développement de la gamme de produits disponibles.

De même, le développement des technologies OGM présente de forts enjeux réglementaires, la réglementation nationale interdisant aujourd'hui l'utilisation de cultures OGM sur le territoire français.

Analyse AFOM

ATOUTS

Tissu dynamique d'acteurs académiques et d'acteurs industriels, majoritairement des PME, positionnés sur le biocontrôle et les biostimulants

Dynamique d'acquisition de PME positionnées sur le biocontrôle par des grands groupes industriels (Lallemand Plant Care, Lesaffre)

Quelques acteurs internationaux implantés en France sur le biocontrôle (site R&D de Bayer CropSciences à Lyon)

FAIBLESSES

Absence de grands groupes agrochimiques français

Difficulté à transposer les résultats du laboratoire au terrain pour les produits biologiques et de SDP

Nombres de solutions homologuées limitées, notamment sur les grandes cultures

Peu de perspectives sur le biocontrôle des adventices

OPPORTUNITÉS

Nécessité d'assurer la production alimentaire pour répondre aux besoins de la population tout en préservant les ressources naturelles

Position proactive de l'Europe sur les questions d'agro-écologie

Adaptation de la réglementation pour favoriser les produits de biocontrôle et certains biostimulants, et favoriser une diminution de l'utilisation des intrants conventionnels en agriculture (Loi n° 2014-1170 du 13 octobre 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt et article 55 concernant les certificats d'économie de produits phytosanitaires)

Marché d'application important sur le territoire français, la France étant la première puissance agricole européenne, avec une grande diversité de cultures

Acceptation sociétale forte des enjeux environnementaux et de la nécessité de trouver de nouvelles approches pour l'agriculture

MENACES

Efficacité moindre et irrégulière des produits de biocontrôle et biostimulation vis-à-vis des produits conventionnels, combinés à des contraintes d'utilisation, et à un coût élevé de ces produits

Lourdeur et coût élevé de la procédure d'homologation des produits innovants de protection et stimulation des plantes

Problème d'acceptabilité sociétale des produits OGM

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

- Anticiper les évolutions réglementaires concernant la phytoprotection et se positionner sur une offre de produits de biocontrôle répondant aux préoccupations aussi bien des pouvoirs publics que des consommateurs et des agriculteurs ;
- Construire une communication autour des produits de biocontrôle et de SDP permettant aux agriculteurs d'intégrer cette démarche dans leurs pratiques de phytoprotection.

Concernant les pouvoirs publics :

- Soutenir le réseau d'acteurs académiques et de R&D (ex. RMT Elicitra) afin de développer les connaissances fondamentales sur les systèmes de protection des plantes ;
- Soutenir le développement du consortium public-privé sur le biocontrôle à l'initiative de l'INRA ;

■ Favoriser une homologation des produits plus rapide et moins coûteuse en :

- Renforçant les équipes d'évaluation afin de raccourcir les délais ;
 - Adaptant les critères d'évaluation aux mécanismes d'action spécifiques aux produits de biocontrôle et biostimulation ;
 - Facilitant la soumission de dossier d'homologation (taxes d'évaluation, etc.).
- Renforcer les dispositifs incitatifs à l'adoption de nouvelles solutions de protection et stimulation des végétaux par les agriculteurs, tels que les certificats d'économie de produits phytosanitaires ;
- Développer un programme d'accompagnement et de sensibilisation des agriculteurs aux nouvelles approches combinées de protection et stimulation des végétaux.
-

Acteurs clés :

Organismes de recherche

Des compétences françaises de recherche sur l'ingénierie génomique sont rassemblées aussi bien dans des EPST⁹ tels que l'INRA (notamment avec le réseau INDRES), des EPIC¹⁰ comme le Cirad, que dans des structures physiques telles que les instituts techniques membres du réseau Acta, comme par exemple Arvalis.

Start-ups et PME

De nombreuses start-ups et PME sont positionnées sur diverses solutions de protection et stimulation des végétaux, et particulièrement sur les solutions de biocontrôle et/ou biostimulation, telles que Goëmar, Biophytech, Elicityl, Vivagro, Rivale, ActionPin, Biosystèmes France, Agri-synergies, Biotop, Agrauxine (Lesaffre)...

Grands groupes

La France dispose de peu de grands groupes agrochimiques ; cependant Limagrain est positionné

sur l'amélioration variétale et certaines solutions de protection des végétaux. L'Allemand **Bayer Crop-Sciences** a installé un centre de recherche dédié à la protection des plantes à Lyon, et **De Sangosse** est positionné sur les solutions de biocontrôle. Ces groupes sont partenaires de réseaux fédérant les industriels positionnés sur le biocontrôle et la biostimulation, comme par exemple **IBMA (International Biocontrol Manufacturers Association)** ou **EBIC (European Biostimulant Industry Council)**.

Écosystème de l'innovation

Les acteurs français proposant des solutions innovantes de stimulation et protection des végétaux sont soutenus par diverses structures, dont des pôles de compétitivité, par exemple **Végépolys** et **Céréales Vallée**, mais également le **RMT (Réseau Mixte Technologique) Elicitra**, ou le **CRT (Centre de Ressources Technologiques) Vegenov**.

9 – Établissements Publics à caractère Scientifique et Technologique

10 – Établissements Publics

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

28 Souches de probiotiques pour la biopréservation et la nutrition

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat,, Santé et bien-être, Sécurité
ALIMENTATION

► **Correspond à une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Microorganismes, nutrition, biopréservation, aliments fonctionnels, santé digestive, fermentation



Définition et périmètre

Des microorganismes sont utilisés depuis de nombreuses années dans la fabrication de produits alimentaires fermentés, tels que le yaourt, le fromage ou le vin. Certains de ces microorganismes sont aujourd'hui utilisés dans un but fonctionnel, pour leurs bénéfices sur la santé ou pour prolonger la conservation des aliments. Les probiotiques sont des micro-organismes (bactéries, levures...) exerçant une influence sur leur environnement, par exemple en inhibant le développement d'autres micro-organismes indésirables ou pathogènes. Ils sont produits grâce à un procédé de fermentation à partir d'une souche sélectionnée. Les propriétés des probiotiques, telles que leurs conditions de croissance, leur comportement en présence d'autres bactéries, leur production de métabolites (polysaccharides, bactériocines...), etc., sont propres à chaque souche, et le processus de sélection d'une souche de probiotiques peut durer plusieurs années. Ces micro-organismes trouvent des applications dans le secteur alimentation, à la fois en nutrition humaine et animale et en biopréservation des aliments.

En nutrition humaine et animale, les probiotiques sont définis comme des « microorganismes vivants qui, lorsqu'ils sont administrés en quantités adéquates, exercent une action bénéfique sur la santé de l'hôte »¹. En effet, ils permettent de réguler l'activité microbienne au sein de l'organisme, via des mécanismes d'action intracellulaires, par exemple en produisant des composés inhibiteurs des agents pathogènes ou en produisant des vitamines et enzymes digestives. Des études ont analysé l'effet des probiotiques sur un grand nombre de troubles, dont les maladies inflammatoires de l'intestin, les infections vaginales, la cirrhose du foie... Cependant, les effets des probiotiques ont principalement pu être mis en évidence pour l'appareil digestif et l'amélioration de la fonction immunitaire.

En nutrition humaine, du fait de leurs effets bénéfiques pour la santé digestive des hôtes, les bactéries probiotiques sont intégrées comme ingrédients dans des aliments, dits « aliments fonctionnels » : yaourts, céréales, boissons. Ils sont également vendus sous forme de compléments alimentaires (gélules, comprimés, sachets...) avec une action ciblée en fonction de

la souche utilisée: améliorer la digestion ou la tolérance alimentaire, renforcer l'immunité, etc. En alimentation animale, les probiotiques sont employés comme complément digestif, afin d'améliorer l'équilibre microbien de la flore intestinale et de prévenir les maladies, favorisant ainsi une croissance importante.

Certains probiotiques ont obtenu des AMM et sont commercialisés en pharmacie, par exemple pour le traitement d'appoint de la diarrhée (*Saccharomyces boulardii* dans la spécialité Ultra-Levure, *Lactobacillus fermentum* et *Lactobacillus delbrueckii* dans la spécialité Lactéol). Cependant, les probiotiques pourraient également trouver des applications en santé au-delà des systèmes digestifs et immunitaires. Des travaux de recherche (Inra, travaux du Consortium MetaHit²) tendent à démontrer que la flore intestinale, et donc l'apport de probiotiques, aurait un impact sur l'axe cerveau-intestin, la santé buccale, la santé de la peau ou les allergies. Ce domaine d'application est cependant encore embryonnaire, les publications scientifiques sur le sujet étant trop peu nombreuses.

Afin de conserver intactes les propriétés des probiotiques dans leur milieu hôte, ceux-ci peuvent ensuite être encapsulés dans des matières protectrices, telles que l'alginate, le carraghénane, la gomme gellane, la gélatine, l'amidon, etc. Différentes techniques d'encapsulation ont été développées : atomisation, gélification ionotropique, extrusion, émulsion, ... Ils peuvent ensuite être intégrés à un produit alimentaire.

Le cas de la biopréservation

Les microorganismes ont toujours été utilisés par l'homme dans des procédés de fermentation modifiant les caractéristiques organoleptiques des matières premières permettant ainsi la conservation des aliments. Il s'agit ici de la plus ancienne technologie de bioprotection des aliments. Plus récemment, des souches bioprotectrices sont utilisées dans des produits non fermentés réfrigérés, dont les caractéristiques organoleptiques ne sont pas liées au développement des micro-organismes, dans le but d'allonger la date limite de consommation (DLC) ou de prévenir le développement d'un danger bactérien. Cette technologie consiste à ajouter des microorganismes,

1 – Définition de l'Organisation Mondiale de la Santé

2 – Mathilde Jaglin. Axe intestin-cerveau : effets de la production d'indole par le microbiote intestinal sur le système nerveux central. Agricultural sciences. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. ; <http://www.metahit.eu>

sélectionnés pour leur capacité à inhiber la croissance d'une flore pathogène ou d'altération, à des aliments, généralement conditionnés sous atmosphère protectrice ou sous vide. Trois filières agroalimentaires sont principalement concernées : les produits carnés, les produits fromagers et les produits de la mer. Il s'agit d'une technologie émergente complexe, la croissance des microorganismes ainsi que leurs effets inhibiteurs étant encore mal maîtrisés.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

De par leurs applications en nutrition, les souches probiotiques répondent à des enjeux de santé, notamment digestive. Les récentes avancées scientifiques démontrent l'importance du microbiote intestinal dans la santé humaine et animale, ainsi qu'un lien avec les maladies métaboliques ou cardiovasculaires. Il s'agit donc d'une source majeure d'innovation dans les domaines alimentaires et médicaux. Leur développement est d'ailleurs favorisé par un intérêt croissant des consommateurs pour leur santé et la prévention des maladies par des moyens naturels.

En nutrition animale, l'interdiction en Europe de l'utilisation des antibiotiques comme promoteurs de croissance en 2006 a créé un fort besoin d'alternatives pour préserver les rendements des élevages en minimisant les maladies et les pertes. Les probiotiques, si leur utilisation n'est pas encore très développée en alimentation animale, constituent un axe d'innovation prometteur qui répond à un vrai besoin.

Concernant la conservation des aliments, la recherche de technologies moins coûteuses que le froid ou alternatives à l'utilisation d'additifs chimiques et d'antibiotiques est un enjeu mondial. Dans ce contexte, la biopréservation des aliments suscite un intérêt grandissant.

Par ailleurs, le gaspillage alimentaire est une préoccupation mondiale. La France affiche une volonté d'action sur ce front avec un objectif de réduction de moitié du gaspillage alimentaire d'ici 2025 prévu dans le Pacte national de réduction du gaspillage alimentaire³. Bien que les aliments les plus gaspillés ne comportent

pas de DLC (fruits, légumes, produits de boulangerie)⁴, la biopréservation, et notamment les avancées dans le domaine des « active packaging », pourraient apporter des éléments de réponse à cette problématique.

Liens avec d'autres technologies clés

■ **Ingénierie génomique et métaomique** : Le séquençage à haut débit et les technologies de métaomique permettent d'étudier les systèmes complexes, dont le microbiote intestinal, et peuvent faciliter la sélection de souches probiotiques en identifiant leurs caractéristiques clés et en analysant leur comportement ;

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique** : Les techniques de modélisation et simulation permettent également d'accélérer la sélection de souches et la gestion des souchothèques, en permettant d'anticiper le comportement des probiotiques dans leur environnement hôte ;

■ **Valorisation et intelligences des données massives** : Les procédés de sélection et de production de probiotiques impliquent la génération d'une grande quantité de données, que les technologies de valorisation et intelligence des données massives permettent de traiter.

Les marchés

Le marché des probiotiques est globalement en croissance, porté surtout par le dynamisme des produits avec probiotiques en nutrition humaine. En 2013, il était estimé à 26 milliards de dollars, avec l'écrasante majorité des usages de probiotiques destinés à l'alimentation humaine, et dominés par les leaders mondiaux Chr. Hansen (Danemark), Danisco (Danemark), Danone (France), Nestlé (Suisse), l'Institut Rosell-Lallemand (Canada), BioGaia Biologics (Suède) et Yakult (Japon).

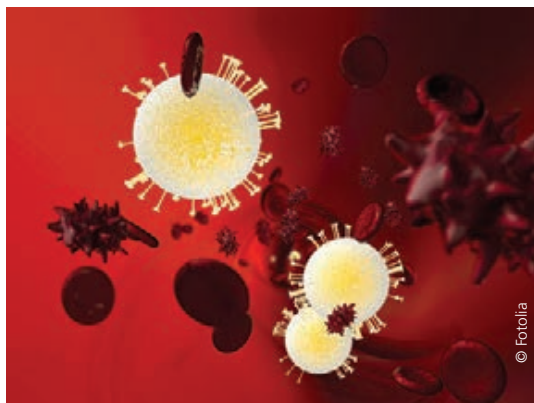
En nutrition humaine, le marché mondial des probiotiques était estimé à 23,4 milliards de dollars en 2013, et devrait atteindre 36 milliards de dollars en 2018⁵. 50 souches différentes sont commercialisées aujourd'hui et intégrées à des aliments (en grande majorité des yaourts) ou vendues en compléments alimentaires, qui représentent 10 % des produits

3 – Données du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

4 – Avis de l'ANSES 2014-SA-0061

5 – Données de Probiota, Conférence 2014

probiotiques. Si le marché des yaourts avec probiotiques est très dynamique en Asie et aux États-Unis, en Europe il s'agit d'un marché plus mature, et les innovations à base de probiotiques sont moins nombreuses, le cadre réglementaire n'étant pas encore clairement défini par l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA).



En nutrition animale, le marché mondial des probiotiques était estimé à 580 millions de dollars en 2014⁶ et destiné principalement à la volaille. Si ce marché est encore peu développé, il devrait augmenter à un CAGR de 7,6 % d'ici 2020⁷, porté surtout par la croissance en Asie-Pacifique.

Le cas de la biopréservation

Le marché de la biopréservation est encore un marché émergent, pour lequel peu de données sont disponibles. En France, plus de 10 Mt de déchets alimentaires sont produits chaque année, dont 1,2 Mt de produits encore consommables, la majorité étant gaspillée par les ménages. Les souches bioprotectrices, en prolongeant la durée de vie des produits, pourraient fournir des solutions pour réduire le gaspillage. Les applications industrielles sont cependant encore limitées, cette technologie étant relativement récente.

Les défis technologiques à relever

En nutrition, il existe des barrières au niveau de l'efficacité des probiotiques. En effet, les souches sélectionnées doivent pouvoir survivre pour interagir avec l'hôte. Or, les microorganismes probiotiques sont soumis à de fortes perturbations, à la fois durant le

procédé de fabrication des produits (décongélation, fermentation, stockage) et au sein du tractus digestif (concentration en oxygène, pH...), qui peuvent impacter leur fonctionnalité. Les connaissances actuelles ne permettent pas de prédire l'impact réel de ces perturbations sur les probiotiques, ainsi que les réactions qu'ils peuvent mettre en place face à ces perturbations. L'action des probiotiques au sein du tractus digestif est ainsi difficile à prévoir, et leur efficacité ne peut être totalement garantie. Le défi consiste donc en premier lieu à développer les connaissances fondamentales sur la biologie des systèmes complexes afin de mieux prévoir le comportement des probiotiques dans leur environnement, et en second lieu à développer les techniques de protection des probiotiques, telles que l'encapsulation.

Concernant la biopréservation, les mêmes barrières limitent les applications industrielles. L'impact des probiotiques sur l'évolution des systèmes microbiens étant mal connu et les mécanismes d'action encore mal maîtrisés, il est difficile de mesurer l'efficacité des flores de microorganismes sur la préservation des aliments ainsi que de s'assurer de leur contrôle et de leur innocuité. L'approfondissement des connaissances ainsi que la modélisation du comportement des souches bioprotectrices dans un système microbien pourraient permettre de lever des verrous dans ce domaine.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'effet bénéfique des probiotiques sur la santé constitue un argument de vente fort pour les industries agroalimentaires. S'ils ont suscité un grand intérêt de la part des consommateurs, ils soulèvent cependant des questions quant à leur efficacité et à leur innocuité. Les principaux défis commerciaux consistent alors à prouver l'efficacité et la pertinence d'une souche probiotique, puis de communiquer sur ses bénéfices santé, sans toutefois afficher d'allégations santé, qui ne sont pas validées par l'EFSA⁸. Les grands groupes adoptent ainsi diverses stratégies, soit en communiquant sur les bénéfices santé de « microorganismes » sans mentionner les probiotiques, soit en communiquant en général sur l'action des probiotiques sans les lier avec leurs marques.

6 – Données de *Marketsandmarkets*

7 – Données de *Grand View Research*

8 – Voir « Les enjeux réglementaires »

Afin d'optimiser la communication, la Ligue Scientifique Européenne pour les Probiotiques a créé un label de qualité pour les probiotiques distribués en pharmacie⁹. Il est destiné à identifier les probiotiques scientifiquement documentés et certifie que les souches sont vivantes et en quantités suffisantes, mais il n'est pas équivalent à une allégation santé.

Les enjeux réglementaires

Le développement puis la commercialisation de souches probiotiques sont soumis à différents enjeux réglementaires.

Concernant leur développement, la mise en œuvre du protocole de Nagoya, soumise en France à l'adoption du projet de loi sur la biodiversité¹⁰ (proposé à l'Assemblée Nationale en 2014 et 2015), pourrait avoir des impacts en recherche & développement. En effet, ce protocole et le projet de loi français visent à protéger les ressources génétiques naturelles de chaque État, comme par exemple les micro-organismes, et à partager les bénéfices commerciaux liés à leur exploitation. Ainsi, les acteurs de la recherche académique comme les acteurs industriels pourraient être soumis à des procédures plus lourdes pour accéder à des ressources naturelles, notamment concernant la preuve de leur origine. Des incertitudes subsistent encore également quant aux modalités de partage des avantages commerciaux, et l'impact pour les centres développant des probiotiques reste à définir.

Par ailleurs, la commercialisation des souches probiotiques comme ingrédients pour l'alimentation humaine pourrait être impactée par la nouvelle réglementation Novel Food¹¹, qui soumet la mise sur le marché de nouveaux ingrédients alimentaires à une autorisation par les autorités sanitaires des États Membres (en France l'ANSES) et de l'EFSA. La liste des ingrédients soumis à la définition de « Novel Food » est en cours de révision. Cette réglementation vise à protéger le consommateur en évaluant la toxicité potentielle du produit et les éventuels déséquilibres nutritionnels induits par son introduction dans le régime alimentaire.

Les effets des probiotiques étant complexes à évaluer, cette réglementation pourrait avoir un impact sur leur commercialisation s'ils y étaient soumis.

Enfin, l'autorisation des allégations nutritionnelles et de santé sont un enjeu majeur pour les probiotiques.

Les allégations sont soumises depuis 2007 à un règlement européen très strict, dans une optique de protection du consommateur. L'autorisation d'une allégation dépend de son évaluation par l'EFSA, et est délivrée par la Commission Européenne. L'EFSA vérifie ainsi l'identification de la bactérie (genre, espèce et souche), la caractérisation de l'effet bénéfique sur la santé de l'hôte, et la justification de l'allégation chez la population cible. La démonstration de l'effet d'une bactérie probiotique est un processus long et coûteux, qui suppose des études *in vitro* et *in vivo*, suivies d'études cliniques. L'invalidation d'un critère suffit à faire rejeter la demande ; aujourd'hui, aucune allégation santé n'a été acceptée par l'EFSA pour les probiotiques. Cependant, la position de l'EFSA pourrait s'ouvrir à des allégations concernant les troubles fonctionnels intestinaux, touchant environ 20 % de la population générale ; les débats en cours sont perçus comme une ouverture par les industriels de l'agroalimentaire sur ce dossier jusqu'alors fermé.

Concernant la biopréservation, il n'existe aujourd'hui aucune réglementation européenne relative à ce domaine. Chaque entreprise doit prouver l'innocuité des souches utilisées, ainsi que leur efficacité ; par ailleurs, la réglementation actuelle ne permet pas l'utilisation de souches de bactéries sur les surfaces d'emballages. Les entreprises les utilisent donc aujourd'hui en tant qu'ingrédient et non comme un additif. Le développement de ce type d'application des souches bioprotectrices pourrait conduire à une évolution de la réglementation, afin de permettre aux entreprises d'utiliser ouvertement les souches sélectionnées en tant que stabilisateurs pour la conservation des produits¹².

9 – Charte du label de qualité de l'European Scientific League for Probiotics (ESLP)

10 – *Projet de loi relatif à la biodiversité N°1847*, proposé à l'Assemblée Nationale

11 – Règlement n°97/258 relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires

12 – PIPAME, 2014 : *Les innovations technologiques, levier de réduction du gaspillage dans le secteur agroalimentaire : enjeux pour les consommateurs et pour les entreprises*

Analyse AFOM

ATOUTS

Réseau de recherche développé et structuré, position dominante de l'INRA à l'international

Historique fort de produits fermentés dans l'industrie française et acceptation sociétale des microorganismes comme agents bénéfiques

Acteurs industriels d'envergure internationale sur l'aspect nutrition

FAIBLESSES

Absence d'acteurs industriels leaders sur la biopréservation

Manque de connaissances scientifiques permettant de comprendre et maîtriser les mécanismes d'action des probiotiques et leurs effets bénéfiques

OPPORTUNITÉS

Volonté de réduction du gaspillage alimentaire

Potentiel développement de produits

Bienfaits apportés par l'augmentation de la DLC pour l'export de produits

MENACES

Applications industrielles en biopréservation limitées du fait d'un manque de définition claire du statut des flores protectrices par la réglementation européenne

Promotion des acteurs en nutrition entravée par le refus des allégations santé par l'EFSA

Facteurs clés de succès et recommandations

Concernant les PME :

- Favoriser des partenariats de co-développement avec des acteurs industriels des marchés applicatifs afin de faciliter l'entrée sur le marché pour de nouvelles souches de probiotiques ;
- Au-delà du développement de nouvelles souches, se positionner sur une offre de biopréservation ou sur des technologies visant à protéger les probiotiques, telles que l'encapsulation.

Concernant les pouvoirs publics :

- Soutenir les efforts de recherche afin d'approfondir les connaissances des systèmes microbiens

complexes et de mieux maîtriser les mécanismes d'action des probiotiques et le risque sanitaire ;

- Soutenir les développements de nouvelles souches probiotiques et la valorisation des principes actifs issus de la fermentation ;
 - Accompagner les différents canaux de communication sur les bénéfices santé des probiotiques ;
 - Favoriser une réglementation claire sur le statut des cultures protectrices et sur les critères de sécurité sanitaire en biopréservation, au niveau européen ou national.
-

Acteurs clés :

Organismes de recherche et de formation

Des compétences en développement de souches probiotiques se trouvent au sein d'EPST tels que **l'INRA** (notamment le site de Jouy en Josas), qui rayonne sur cette thématique à l'international, d'EPIC tels que **l'Ifremer** positionné notamment sur la biopréservation, ou de structures physiques telles que **l'Oniris (École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation)** ou **l'Institut Pasteur de Lille**.

Start-ups et PME

Plusieurs start-ups et PME sont positionnées sur ce domaine : par exemple **Génibio** ou encore **VF Biosciences** qui développent des souches probiotiques pour des applications en santé ou en nutrition, **BioArmor** qui conçoit des produits pour l'alimentation contenant des probiotiques pour l'élevage, **les Laboratoires Standa** et **Biocéane** qui proposent des produits à base de probiotiques pour les emballages actifs et la biopréservation...

Grands groupes

Des acteurs industriels d'envergure internationale sont positionnés sur les probiotiques, notamment sur des applications en nutrition / compléments alimentaires

comme **Danone**, **Lesaffre Human Care**, **Aragan**, ou **Adisséo** pour l'alimentation animale, ou sur des solutions à base de ferments lactiques pour l'industrie agroalimentaire comme **Bioprox**, le Pôle Industrie alimentaire et solutions biotechnologiques de Proxis Développement. Les plus grands acteurs mondiaux des probiotiques, dont Danone, sont fédérés au sein de la *Global Alliance for Probiotics*.

Écosystème de l'innovation

Les acteurs français des probiotiques sont soutenus par diverses structures, notamment des pôles de compétitivité comme les pôles **Nutrition Santé Longévité** ou **Vitagora**, les Instituts Techniques Agro-Industriels (ITAI) tels qu'**Actalia**, **Adria Développement**, **IFIP (Institut Français du Porc)**, **Aérial**, **ADIV (Association pour le Développement de l'Industrie de la Viande)**. **Le RMT (Réseau Mixte Technologique) Florepro « Flores protectrices »** assure un lien entre la recherche académique, les acteurs industriels et les pouvoirs publics positionnés sur cette thématique, et le cluster **Institut de Recherche Pharmabiotique** rassemble des académiques et des industriels du secteur des probiotiques pour développer leur potentiel thérapeutique. Finalement, **MétaGénoPolis (MGP)** met à la disposition de la communauté académique, médicale et industrielle des équipements autour de plateformes innovantes.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

29 Ingénierie tissulaire et cellulaire

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE , Sécurité
Alimentation

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Médecine régénérative ; thérapie
cellulaire ; cellules souches
et différenciées ; bioéthique ;
compétences pluridisciplinaires ;
cellules autologues et allogéniques ;
bioproduction.



Définition et périmètre

Définition

D'une manière générale, l'ingénierie tissulaire et cellulaire couvre **l'ensemble des technologies de transformation et d'organisation de cellules, de tissus et de biomatériaux** afin de mieux **prédire, traiter et contrôler** à des fins de santé.

■ L'ingénierie cellulaire comprend plus particulièrement l'ensemble des technologies permettant de produire et d'entretenir des modèles cellulaires, d'optimiser les conditions de culture, de réaliser des transfections et des transplantations et de contrôler les lignées cellulaires ;

■ L'ingénierie tissulaire quant à elle applique les principes de l'ingénierie et des sciences de la vie afin de développer des substituts biologiques qui vont restaurer, maintenir ou améliorer la fonction des tissus.

Des formes d'ingénierie fortement liées

Ces deux formes d'ingénierie sont intrinsèquement liées et permettent non seulement le développement de la **médecine régénératrice** mais aussi la **production de molécules d'intérêt**.

L'ingénierie tissulaire comme cellulaire, implique également des **compétences pluridisciplinaires** : science des matériaux, biologie cellulaire, chimie, physique et biomécanique.

Autre point commun entre ingénierie cellulaire et tissulaire, la mobilisation de cellules **autologues** (provenant de l'organisme receveur) ou **allogéniques** (provenant d'un organisme compatible).

Ces cellules peuvent être des **cellules différenciées** ou des **cellules souches**, en sachant que les recherches s'orientent davantage sur les cellules souches adultes et embryonnaires, bien que ces dernières cellules fassent l'objet d'une réglementation particulièrement stricte. Une troisième voie a été rendue possible avec la **création de cellules souches pluripotentes induites (IPS)** obtenues par reprogrammation génétique de cellules adultes différenciées. Elles présentent les avantages des cellules souches embryonnaires (plus grandes possibilités de différenciation) sans leurs inconvénients éthiques (destruction d'un embryon). Néanmoins, l'utilisation de ces cellules est très récente et doit encore faire l'objet de progrès techniques.

De nombreuses applications possibles

Les **aires thérapeutiques** couvertes par l'ingénierie cellulaire et tissulaire sont nombreuses, elles s'étendent à l'immunologie, l'oncologie, l'orthopédie mais trouvent également des applications dans les domaines cardiovasculaire, du diabète ou de la peau. À l'horizon 2020, de nouvelles applications pourraient voir le jour pour les maladies neuro-dégénératives.

L'ingénierie cellulaire et tissulaire permet également de développer de nouveaux systèmes de **bio-production** comme par exemple des biomatériaux de *bioprinting* et de génome *editing* (production de molécules à haute valeur ajoutée).

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Des technologies d'intérêt pour l'ensemble des acteurs

À l'échelle internationale, de nombreux investissements sont réalisés pour promouvoir la **recherche** mais également soutenir **les entreprises de biotechnologie** positionnées sur les marchés de l'ingénierie tissulaire et cellulaire.

Les multiples possibilités d'applications que représente l'ingénierie cellulaire et tissulaire (maladie de Parkinson, médecine régénérative, oncologie, cécité, diabète, etc.) suscitent l'intérêt des acteurs de la santé. Les entreprises du médicament et grands acteurs industriels se positionnent ainsi sur ce domaine, à l'instar de Servier qui collabore depuis 2013 avec Cellctis pour traiter des leucémies par thérapie cellulaire allogénique. Via leurs fonds d'investissements, certains industriels se positionnent également sur ce secteur, comme Shire et Boehringer Ingelheim.

Atouts de la France

Bien que le tissu industriel français doive encore accroître sa densité au regard du leader mondial que sont les États-Unis, les **entreprises françaises sont bien positionnées** et les plus importantes bénéficient d'investissements (la plateforme de *CellForCure* a par exemple bénéficié des financements dans le cadre du Programme d'Investissements d'avenir).

La France a en outre été pionnière dans l'utilisation des cellules souches de sang ombilical et conserve aujourd'hui sa bonne position dans le segment très porteur des cellules souches. L'inauguration de la pre-

mière plateforme industrielle pour la production de médicaments de thérapie cellulaire par **CellForCure** (filiale du groupe pharmaceutique LFB) marque un pas vers le **rapprochement des domaines académiques et industriels**.

La France s'appuie ainsi sur une **position en R&D très favorable** : les équipes françaises de recherche académique ont une taille critique pour compter au niveau international, le niveau de recherche est particulièrement élevé, et les réseaux/*bioclusters* sont suffisamment structurés.

L'Établissement français du sang (EFS) est également un acteur important du développement de techniques de thérapies cellulaires, à travers notamment l'Atlantic Bio GMP, premier établissement pharmaceutique de statut public en France et plateforme innovante dédiée à la production de médicament pour les phases I et II des essais cliniques, en partenariat avec l'AFM (Association française contre les myopathies), l'Inserm et le CHU de Nantes. L'Unité d'ingénierie et de thérapie cellulaire (composée d'un site de production de produits de thérapie cellulaire et tissulaire ainsi que d'une structure de recherche et de transfert technologique) est une autre réalisation dans laquelle l'EFS est impliqué. L'EFS, *leader* sur le marché national des produits de thérapies cellulaires et tissulaires, est aussi impliqué dans plusieurs projets de recherche européens consacrés aux cellules souches et à la thérapie cellulaire, comme CASCADE, REBORNE et ADIPOA. L'Établissement français du sang a également été impliqué en partenariat avec Sanofi dans l'étude OSMOZ, registre observationnel des patients traités par Mozobil (traitement pour la mobilisation des cellules souches hématopoïétiques en vue d'une autogreffe.)

La France dispose enfin d'une **continuité entre le secteur académique et le secteur clinique** qui permet un accès compétitif au développement clinique.

Liens avec d'autres technologies clés

Le développement de technologies d'ingénierie cellulaire et tissulaire influe fortement sur le développement d'autres technologies clés 2020 :

■ **Les nouvelles modalités d'immunothérapie** avec le développement accéléré ces dernières années d'immunothérapie par thérapie cellulaire (engouement qui intéresse des industriels comme Novartis, GSK, Pfizer) ;

■ **L'Ingénierie génomique**, qui nécessite dans ses applications en thérapie génique notamment de faire intervenir des cellules spécialisées pour transporter des vecteurs de gènes.

Les marchés

Un marché mondial en très forte croissance à l'horizon 2020

Le marché mondial de l'ingénierie tissulaire et de la thérapie cellulaire approche les 9,9 milliards de dollars en 2014 et devrait atteindre **73 milliards de dollars d'ici à 2025**, sur une base de croissance annuelle moyenne particulièrement élevée, **estimée à 21 %**¹.

Cette forte croissance du marché s'explique notamment par le fait que de nombreuses nouvelles modalités de thérapies cellulaires sont découvertes et entrent sur le marché. D'autres sont également en phases cliniques et devraient arriver sur le marché dans les prochaines années. De plus, il **n'existe aujourd'hui pas d'autres options thérapeutiques en médecine régénérative ou tissulaire**, notamment sur certains segments comme celui des organes déficients².

En 2015, les États-Unis dominent le marché mondial. À l'horizon 2020, le marché asiatique devrait enregistrer les plus forts taux de croissance du fait notamment du nombre important de nouveaux produits actuellement en développement dans cette région du monde.

Des segments de marché naissants mais prometteurs

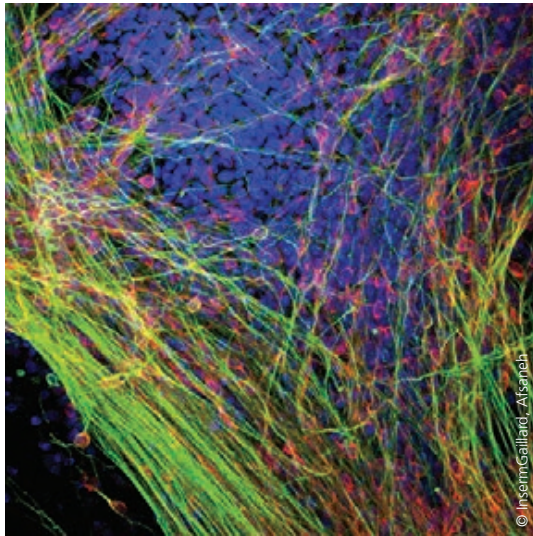
Si seulement 42 produits sont disponibles sur le marché mondial début 2011, le segment naissant des produits de biothérapies cellulaires est quant à lui estimé à 3 milliards de dollars en 2015³, alors que le segment des thérapies par cellules souches, estimé à 63 millions de dollars en 2015, devrait atteindre les 330 millions de dollars à l'horizon 2020 avec une croissance annuelle moyenne particulièrement importante de 39,5 %⁴. Sur ce dernier segment, plusieurs facteurs sont à l'origine d'une forte croissance. Tout d'abord,

1 – *The Future of Tissue Engineering and Cell Therapy to 2025*, Smithers Apex, février 2015.

2 – *Global Cell Therapy Market Outlook 2020*, Kuick Research, may 2015

3 – Données du LEEM

4 – *Stem Cell Therapy Market Regulatory Landscape, Pipeline Analysis & Global Forecasts to 2020*, RnRMarketResearch, 2014.



les fonds octroyés à la recherche tant par les gouvernements que par les organisations privées permettent de dynamiser le marché. La prise en compte croissante des applications thérapeutiques que promettent d'offrir les thérapies par cellules souches est un autre élément qui pousse les acteurs à se positionner sur ce segment, qui retient particulièrement l'attention des industriels et des investisseurs, comme Novartis, GSK ou Pfizer, dans le domaine de la thérapie cellulaire appliquée notamment à l'oncologie.

Les défis technologiques à relever

Développer les connaissances sur la différenciation cellulaire

Les enjeux technologiques du domaine de l'ingénierie tissulaire et cellulaire concernent notamment l'amélioration de la compréhension de la biologie et des cellules souches. La meilleure maîtrise des techniques de différenciation cellulaire est ainsi un élément essentiel pour le développement de nouvelles thérapies cellulaires et tissulaires plus fiables et efficaces.

Améliorer la résistance et les méthodes d'administration des cellules implantées

La robustesse des méthodes est également un point d'amélioration important, elle concerne par exemple l'amélioration du taux de survie des cellules implantées. Le recours aux nanotechnologies et plus largement aux techniques de vectorisation pourrait permettre d'optimiser le taux de survie des cellules en assurant une meilleure administration de ces dernières dans les organismes où elles sont implantées.

L'adaptation des méthodes existantes d'administration de cellules est également nécessaire puisque de nouvelles applications thérapeutiques, telles que les maladies neuro-dégénératives, vont modifier le type de cellule à implanter dans des zones du corps humain complexes d'accès.

Cellules allogéniques ou autologues : quel modèle pour quelle structure ?

Autre défi technologique en lien avec les défis commerciaux, la nécessité pour les industries pharmaceutiques d'orienter les thérapies vers des modèles utilisant les cellules allogéniques plutôt qu'autologues. Cela permettrait de mieux correspondre aux *business models* habituellement utilisés par l'industrie pharmaceutique, et qui apparaissent plus simples à mettre en œuvre (*i.e. médicament prêt à être utilisé*).

À noter toutefois, les deux modèles présentent des avantages et inconvénients, et le modèle autologue peut convenir à certaines industries.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Coûts de développement élevés et difficulté d'accès aux financements pour les PME

Les industriels du domaine de l'ingénierie cellulaire et tissulaire sont confrontés à des coûts de développement particulièrement élevés, la thérapie cellulaire nécessitant des technologies avancées. De ce fait, l'accès aux financements est difficile pour les PME, d'autant plus qu'**il n'existe pas en France de fonds publics dédiés** alors que c'est le cas dans les principaux pays concurrents.

Concurrence internationale et thérapeutique

Les États-Unis dominent en outre très clairement le secteur de la recherche sur les cellules souches ainsi que le développement clinique de produits, ce qui laisse peu de place à l'émergence de nouveaux acteurs d'autres pays.

Enfin, des thérapies ciblées, jugées plus simples à mettre en œuvre, sont des concurrentes importantes, notamment sur la problématique du remboursement.

Les enjeux réglementaires

Malgré des évolutions notables ces dernières années, de nombreux enjeux subsistent sur les aspects réglementaires de l'ingénierie cellulaire et tissulaire, sur des **aspects éthiques** en particulier.

La recherche sur les cellules souches embryonnaires : source de débats éthiques.

Longtemps interdite, la recherche sur l'embryon et les cellules souches embryonnaires a été autorisée sous conditions⁵ par la loi du 6 août 2013 tendant à modifier la loi du 7 juillet 2011 relative à la bioéthique. Si l'autorisation sous contrainte était déjà établie par la loi de 2004, cette **révision constitue un progrès notable favorisant la recherche pour des thérapies cellulaires et tissulaires**, même si toute recherche fondamentale reste exclue.

À l'échelle européenne, il n'existe pas, malgré plusieurs directives relatives à la santé publique, de législation globale relative à la recherche bioéthique. Il en résulte

une grande disparité entre les différentes législations des pays membres, ce qui montre que des **difficultés d'acceptabilité sont encore présentes**.

Un cadre réglementaire complexe et peu lisible.

Le cadre réglementaire national comme européen qui encadre les produits des thérapies cellulaires et tissulaires reste complexe, peu lisible et surtout peu connu des acteurs, particulièrement des structures académiques et des TPE/PME malgré des efforts de communication réalisés au niveau européen et national⁶. Le règlement européen « *médicaments de thérapie innovante* » entré en vigueur en 2008 a permis l'harmonisation des législations à ce sujet mais le besoin de plus de lisibilité est toujours présent.

Analyse AFOM

ATOUTS

Excellence académique et continuité entre l'académique et le clinique

Fortes compétences (cellules de sang ombilical et cellules souches)

FAIBLESSES

Cadre législatif peu lisible pour les acteurs

Tissu industriel peu dense

Accès aux financements difficile pour les industriels

OPPORTUNITÉS

Multiplicité des possibilités d'applications thérapeutiques, en particulier pour les maladies neuro-dégénératives et l'oncologie

Autorisation conditionnelle de la recherche thérapeutique sur les cellules souches embryonnaires

Tendance à l'assouplissement des cadres nationaux en bioéthique

Développement des cellules souches pluripotentes induites (IPS)

MENACES

Forte concurrence des États-Unis

Des freins éthiques et sociaux perdurent

5 – Les projets autorisés doivent répondre à plusieurs critères dont des critères de pertinence, d'éthique et à l'objectif d'apporter des progrès médicaux majeurs qui ne peuvent pas être réalisés en utilisant un autre type de cellule. L'Agence de la biomédecine assure l'encadrement de la recherche.

6 – Dossier de l'ANSM

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics

■ Les initiatives pour développer une masse critique du tissu industriel aujourd'hui peu conséquent doivent également être soutenues, sur le modèle de la plateforme *CellForCure* par exemple, ou prendre la forme de **Fonds Unique Interministériel** (Ces fonds existent aujourd'hui pour accompagner des projets d'industrialisation mais sur des financements aux montants limités).

■ Le cadre réglementaire concernant les médicaments de thérapie innovante doit être simplifié et surtout être rendu plus lisible aux acteurs du secteur, TPE et PME en particulier.

Aux industriels

■ Afin de développer le secteur français de l'ingénierie tissulaire et cellulaire, une structuration de la filière industrielle en partenariat avec les pouvoirs publics est nécessaire pour conforter et affirmer le passage du stade de recherche au stade industriel.

Les entreprises françaises doivent ainsi **se rapprocher du secteur académique**, par le biais par exemple des pôles de compétitivité et des SATT, ce qui permettrait en outre de favoriser leur développement à l'international

■ En l'absence de fonds dédiés, les entreprises françaises doivent également **aller chercher des financements** dans des programmes européens et internationaux, à l'instar de *EuroStemcell* ou *l'International Stem Cell Forum* (ces projets sont financés dans le cadre du programme H2020).

■ Les PME peuvent également **orienter leurs thérapies utilisant des cellules allogéniques** plutôt qu'autologues, thérapies dont le *business model* est plus simple à mettre en œuvre. Ces cellules sont en effet disponibles en plus grand nombre que les cellules autologues et les procédés les concernant peuvent être standardisés. A noter toutefois, des traitements autologues peuvent constituer des niches pertinentes pour certaines TPE et PME.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

En France, de nombreux organismes contribuent à la recherche sur l'ingénierie cellulaire et tissulaire. C'est le cas notamment du laboratoire d'ingénierie cellulaire et biotechnologie (LICB) du **CEA**. Le Laboratoire **CellTech**, situé dans les locaux de l'école Sup'Biotech travaille également en partenariat avec le CEA sur le développement de modèles de différenciation de cellules IPS en neurones en vue de traiter les maladies neuro-dégénératives.

L'Institut des cellules souches pour le traitement et l'étude des maladies monogéniques ou **I-Stem** est un autre acteur important soutenu par le **Genopole** et issu d'une collaboration entre **l'AFM, l'Inserm et l'Université Evry-Val-d'Essonne**.

L'**EFS** contribue également à la recherche sur les thérapies cellulaires et tissulaires via notamment sa participation aux programmes européens CASCADE, REBORNE et ADIPOA.

De nombreux hôpitaux et instituts sont aussi impliqués dans des programmes de recherche à l'instar du CHU Hôtel Dieu Nantes, de l'Hôpital Necker, de l'Hôpital Saint-Louis, de l'Institut Cochin, de l'Institut Curie, de l'Institut des biothérapies, de l'Institut de recherche biologique, de l'Institut du thorax et de l'Institut Pasteur.

Organismes d'interface

Les pôles de compétitivité, dont **Atlanpole biothérapies et Medicen Paris Région** sont des exemples, soutiennent les entreprises françaises dans leur développement et se situent à l'interface entre les secteurs publics et privés. Le pôle Medicen Paris Région est ainsi par exemple à l'origine du **projet européen IngeCELL**, qui vise notamment le marché de la thérapie cellulaire dans les domaines neuromusculaire, neurologique, hépatologique, et cardiovasculaire.

L'institut Thématique Multi Organisme « Ingénierie et Technologies pour la Santé » du **CVT AVISEAN** rassemble 91 unités françaises de recherche et a pour premier défi de développer des biomatériaux inno-

vants en ingénierie tissulaire et médecine régénérative. Collaborent à cet institut de nombreux organismes tels que l'Inserm, le CEA, l'INRA, le CNRS, l'Inria, l'Institut Pasteur, l'Institut Curie et l'IRD.

Grandes entreprises

La principale grande entreprise française positionnée dans le domaine de l'ingénierie tissulaire et cellulaire est le groupe pharmaceutique **Servier**, qui collabore depuis 2013 avec la société de biotechnologie *Cellctis* pour traiter des leucémies par thérapie cellulaire allogénique.

Startups et PME

Malgré un tissu industriel relativement dense, certaines PME françaises sont bien positionnées dans

l'écosystème de l'ingénierie cellulaire et tissulaire. C'est de cas de **Cellprothera**, biotech spécialisée dans la thérapie cellulaire pour la médecine régénératrice cardiaque, **CellForCure**, première plateforme industrielle pour la production de médicaments de thérapie cellulaire, **Celletics**, société spécialisée dans l'ingénierie des génomes et sa filiale **EctyCell**, dédiée aux applications médicales des cellules souches, **ABCell-Bio**, positionnée sur la recherche in vitro et la thérapie cellulaire, **Endocells**, qui développe une plateforme technologique cellulaire, **Icelltis**, fournisseur de cellules humaines, **Neuronax**, qui développe des thérapies cellulaires pour le traitement de pathologies traumatiques et dégénératives du système nerveux central et de **Texcell** qui propose des services de culture cellulaire.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

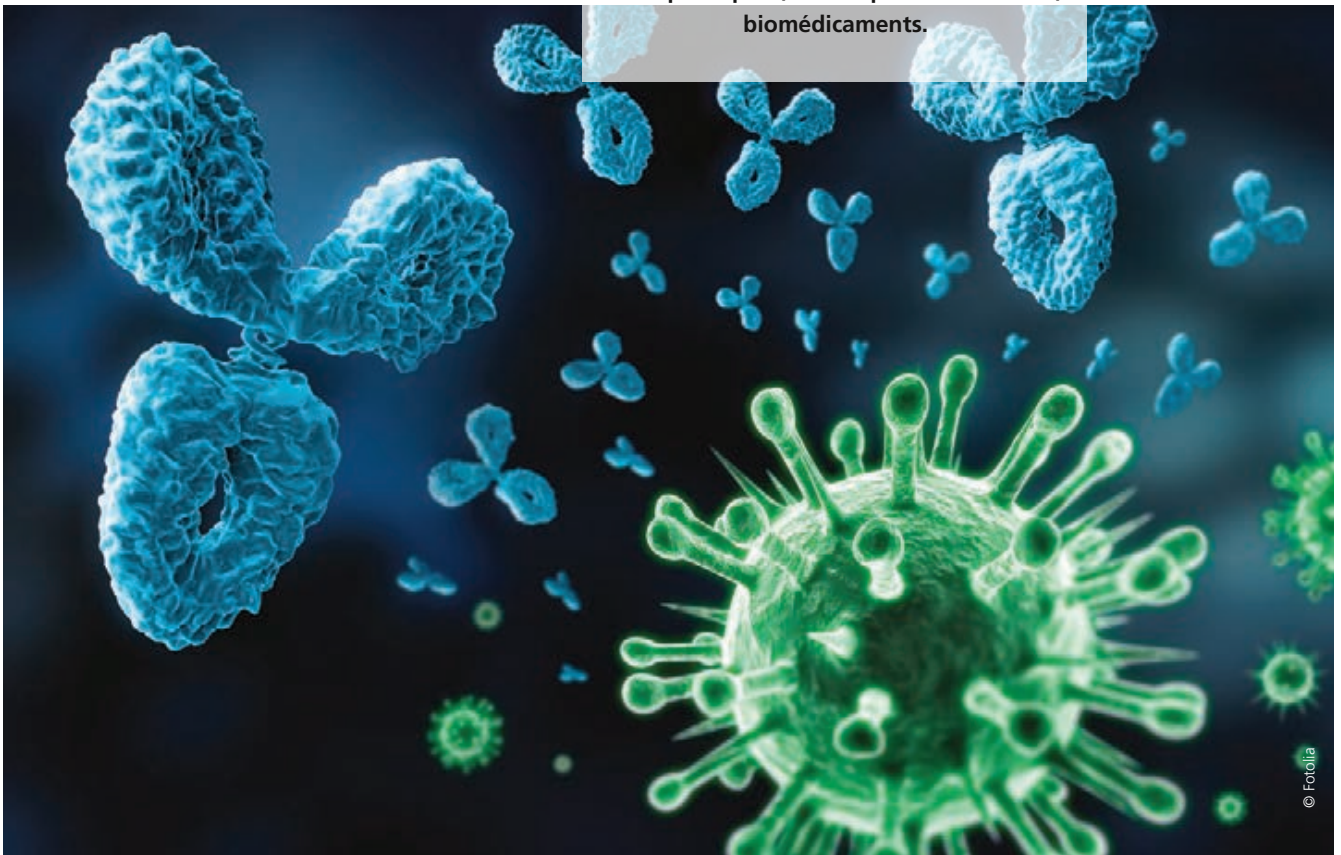
30 Nouvelles modalités d'immunothérapie

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE , Sécurité
Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Thérapie cellulaire ; vaccins thérapeutiques ; anticorps monoclonaux ; biomédicaments.



Définition et périmètre

Définition

Le système immunitaire est un système de défense naturel de l'organisme composé d'un réseau complexe de cellules, d'organes et molécules. Le **but de l'immunothérapie est d'administrer des substances qui stimulent, modifient ou optimisent tous ces composants**.

Initialement orientée autour de la vaccinologie et des greffes de moelle osseuse, l'immunothérapie recouvre depuis quelques années, grâce aux avancées de la médecine, **un nombre plus important de modalités, préventives ou curatives**, faisant appel au système immunitaire des individus. Parmi ces nouvelles modalités qui viennent compléter celles déjà existantes, l'on retrouve :

- Les anticorps monoclonaux spécifiques (mAbs) ;
- Les siRNA (petits ARN interférents) et l'ARNm (ARN messager) ;
- Les médiateurs immunitaires ;
- La vaccination thérapeutique (qui se distingue de la vaccination préventive) ;
- Les thérapies cellulaires et les agents immuno-modulateurs.

Ces nouvelles modalités s'inscrivent parfaitement dans le cadre de la médecine personnalisée puisqu'elles permettent des **thérapies ciblées et spécifiques**.

Un vaste périmètre d'aires thérapeutiques concernées

Les applications de l'immunothérapie sont multiples et **concernent de nombreuses aires thérapeutiques** comme l'oncologie, les maladies infectieuses (VIH et hépatites B et C), les maladies inflammatoires, les maladies de la peau et des os, les maladies du système nerveux central, les allergies, les transplantations, les maladies chroniques ou les maladies auto-immunes.

Des technologies de pointe

L'immunothérapie est un champ thérapeutique en pleine évolution qui utilise des **technologies de plus en plus sophistiquées**, comme par exemple des fragments d'anticorps couplés à des radioéléments, à des récepteurs ou à des peptides.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché des nouvelles modalités d'immunothérapie est liée au développement d'autres technologies clés 2020, comme par exemple :

- **L'ingénierie génomique** qui contribue à la production par exemple de cellules CAR T, cellules de la réponse immunitaire ;
- **L'imagerie pour la santé** qui est un outil de la recherche sur le fonctionnement du système immunitaire.

A l'inverse, le marché de **l'ingénierie cellulaire et tissulaire** est directement influencé par le développement accéléré des modalités d'immunothérapie.

Les marchés

Du fait notamment de la diversité d'applications de l'immunothérapie, **un tiers des médicaments développés dans le monde aujourd'hui relève de ce domaine**¹ et le marché devrait continuer à croître à l'horizon 2020.

Certains segments du marché de l'immunothérapie sont difficiles à évaluer, par manque de maturité pour certains (vaccins thérapeutiques, immunothérapies par thérapie cellulaire, immunothérapies par siRNA et par ARNm). Les principaux segments (vaccins et traitement des cancers) enregistrent quant à eux de fortes croissances et porteront l'ensemble du marché de l'immunothérapie à l'horizon 2020.

Les principaux segments technologiques en croissance.

Les segments de l'immunothérapie enregistrent de forts taux de croissance, comme par exemple le marché des vaccins, qui en 2013 représentait un chiffre d'affaires de 30,5 milliards de dollars et devrait atteindre en **2020 plus de 67 milliards de dollars** sur la base d'une croissance moyenne annuelle de **12 %**². Ce segment est particulièrement concentré à l'échelle mondiale puisque les quatre compagnies *leaders* (Pfizer, Novartis, Sanofi et GlaxoSmithKline) contrôlent 74 % du marché.

1 – Données du LEEM

2 – *Global Vaccine Market Outlook 2020*, RNCOS, mai 2014

Pour ce qui est du segment particulier des produits d'anticorps monoclonaux, en 2014, 47 produits ont été approuvés aux États-Unis et en Europe représentant un chiffre d'affaires de près de 75 milliards de dollars. Sur la base du développement de 4 nouveaux produits par an ce sont ainsi 70 produits qui devraient être présents sur le marché en **2020, cumulant des ventes d'environ 125 milliards de dollars**³. L'Europe et les États-Unis font figure de marchés précurseurs. Toutefois des acteurs concurrents émergent en Amérique du Sud, en Chine, en Asie du sud-est, en Inde et en Russie qui disposent d'une dizaine de produits approuvés sur leurs marchés respectifs, principalement des produits biosimilaires. Le nombre de pathologies pouvant être traités par les produits issus d'anticorps monoclonaux augmente et devrait continuer de croître dans les années à venir.

L'immunothérapie appliquée en oncologie : un marché particulièrement prometteur.

Les produits d'immunothérapie pour traiter les cancers représentent quant à eux **en 2014 plus de 50 % de l'ensemble des médicaments d'oncologie, soit environ 41 milliards de dollars** et devraient enregistrer de fortes croissances à l'horizon 2020⁴. Ces produits, en ciblant uniquement les cellules cancéreuses, ont réussi à s'imposer sur ce marché permettant l'allongement de l'espérance de vie des patients.

L'application de l'immunothérapie en oncologie est particulièrement prometteuse : des médicaments ont déjà démontré leur efficacité (le trastuzumab pour certains cancers du sein, le rituximab pour les lymphomes, le cétuximab pour les cancers du côlon, etc.) et une nouvelle génération de molécules encore plus efficaces devrait entrer sur le marché dans les prochaines années (comme par exemple celles composant le nivolumab dont les premiers résultats des essais cliniques, sur les patients atteints d'un cancer du poumon, font état d'une efficacité thérapeutique supérieure par rapport aux précédents traitements, malgré une toxicité élevée du traitement)

3 – Jones SD, Levine HL., *The therapeutic monoclonal antibody market*, mAbs volume 7, issue 1, 2015

4 – *Global & USA Cancer Immunotherapy Market Analysis to 2020*, Research and markets, Avril 2015

De plus en plus de grands groupes pharmaceutiques s'intéressent ainsi au développement de ces nouvelles thérapies, comme Novartis, GlaxoSmithKline, Roche, Merck ou Pfizer. Ces groupes s'appuient sur les compétences d'entreprises de biotechnologies pour développer leurs produits, notamment avec des *start-up* françaises comme Innate Pharma ou Ose Pharma.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Des applications dans des aires thérapeutiques répondant à des besoins médicaux majeurs

Outre le fait qu'elle constitue un marché important en forte croissance, l'immunothérapie regroupe un ensemble de technologies essentielles dans le développement de nouveaux traitements pour certaines pathologies.

Ces technologies seront particulièrement importantes à l'horizon 2020 puisque ce domaine aura un impact significatif sur quatre aires thérapeutiques répondant à des besoins médicaux majeurs : **les transplantations** (principalement pour des immunosuppresseurs afin de prévenir les rejets), **les maladies auto-immunes**, **les maladies infectieuses** et **l'oncologie**.⁵ Cette dernière aire est d'autant plus importante que les cancers totalisaient en 2012 près de 8,2 millions de décès, en faisant la première cause de mortalité à travers le monde⁶, ce nombre étant amené à croître fortement au cours des prochaines années.

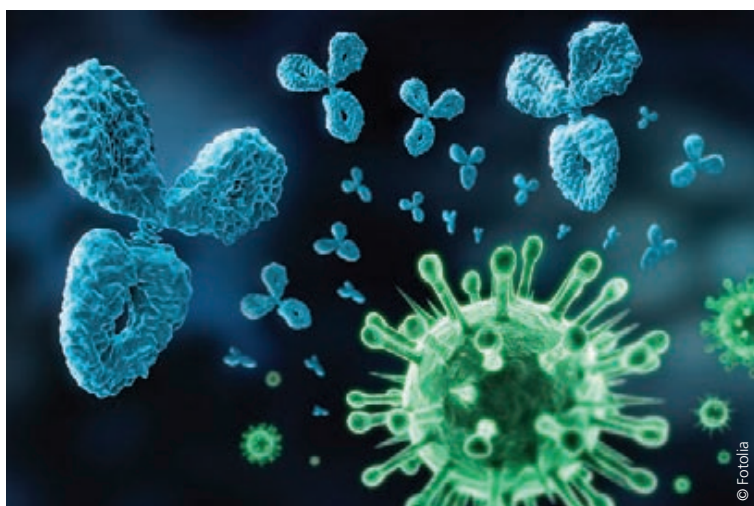
Les nouvelles modalités d'immunothérapie pourront également trouver à terme des applications pour **les maladies neurodégénératives** dont la prévalence va augmenter dans les pays développés où la population est vieillissante.

Atouts de la France

La France est en bonne position en ce qui concerne l'ingénierie du système immunitaire. Elle possède **d'importantes forces académiques**, notamment avec l'Institut Pasteur et les Labex présents sur son territoire (IGO, IRON). Ses forces industrielles sont également importantes : 58 sociétés de biotechnologie

5 – Données du *LEEM*

6 – Chiffres de l'*OMS*



et 7 sociétés pharmaceutiques⁷ travaillent dans le champ de l'immunothérapie. La France est par ailleurs **historiquement bien positionnée dans le domaine de la vaccinologie**. Elle fait ainsi figure de leader du marché européen et certains de ses industriels comme Sanofi ou Merial font partie des leaders mondiaux (à noter toutefois, cette position de leader est contrebalancée par le faible volume d'essais cliniques réalisés⁸). Enfin, les compétences de la France sont importantes dans le domaine des **immunomodulateurs**.

Les défis technologiques à relever

Pousser la compréhension des mécanismes du système immunitaire

Une meilleure compréhension du fonctionnement du système immunitaire apparaît nécessaire afin de développer des technologies innovantes en immunothérapie. Pour ce faire, la poursuite d'efforts en recherche fondamentale est nécessaire.

Améliorer la vectorisation des siRNA

L'amélioration de la vectorisation de siRNA (petits ARN interférents qui peuvent empêcher l'expression de gènes) est essentielle pour le développement des immunothérapies. La délivrance de ces ARN interférents nécessite en effet de meilleures formulations pour

améliorer l'absorption cellulaire et la localisation cytoplasmique des siRNA afin d'élargir les types de cellules dans lesquels ils peuvent être délivrés.

Améliorer la stabilité et la persistance des anticorps monoclonaux

L'amélioration de la stabilité des anticorps monoclonaux thérapeutiques est un autre enjeu important. Ils se distinguent en effet des médicaments traditionnels par leur structure, dont certaines modifications mineures peuvent rendre les anticorps toxiques pour l'organisme receveur. Cela constitue l'un des **verrous actuels du développement d'anticorps thérapeutiques diversifiés**.

Ces anticorps ont également une durée de vie limitée dans l'organisme et plus particulièrement dans le sang, ce qui limite leur efficacité. L'amélioration de leur persistance constitue un défi technologique clé qui permettrait de réduire la fréquence d'injection chez le patient et donc le coût du traitement.

Thérapies ciblées et sélection des patients

Par ailleurs, les thérapies ciblées permettent d'améliorer l'efficacité d'un traitement mais n'excluent pas la résistance de certains patients. Afin d'améliorer la sélection des patients avant l'immunothérapie et ainsi diminuer la toxicité et les coûts, **l'identification des facteurs prédictifs de réponse est un enjeu primordial** (il peut s'agir de caractéristiques démographiques ou cliniques, de dosages biologiques, de tests fonctionnels ou de typages génétiques). **L'état des connaissances sur ces types de biomarqueurs** nécessite donc d'être approfondi pour chaque traitement.

Les défis commerciaux à relever

Difficultés dans le transfert technologique

En France, un enjeu commercial majeur concerne la valorisation de la recherche et le transfert technologique. Il s'avère en effet que des difficultés sont présentes dans le passage des milieux académiques vers les milieux industriels, et ce malgré l'action de de SATT et de pôles de compétitivité en matière de transfert technologique. Le défi pour les PME françaises est donc de réussir à se rapprocher du secteur académique et d'échanger sur leurs besoins afin de valoriser les innovations les plus prometteuses.

7 – Renforcer la filière immunothérapie en France, Leem, 2012

8 – 7 % des essais cliniques mondiaux réalisés en France en 2011. Renforcer la filière de l'immunothérapie en France, LEEM, 2012

L'accès aux financements pour les PME françaises

Du fait du caractère très coûteux du développement de thérapies ciblées, l'accès au financement pour les entreprises est un enjeu difficile à atteindre. De nombreux projets sont ainsi abandonnés par manque de fonds d'amorçage.

Des produits développés peu matures

Le caractère nouveau sur le marché des produits développés par des entreprises françaises, des PME en particulier, est un autre enjeu important. Il induit en effet un manque de visibilité et de preuves de succès, notamment pour les sociétés capables de produire des lots cliniques. Le défi pour les pouvoirs publics est donc d'assurer un continuum de financement afin de soutenir et valoriser les entreprises innovantes.

Les enjeux réglementaires

Relativement peu d'enjeux réglementaires concernent les technologies des nouvelles modalités d'immunothérapie.

On peut tout de même relever le fait que le **seuil d'exigence français est particulièrement élevé** en termes de sécurité virale, ce qui peut engendrer des difficultés dans la mise en place d'essais cliniques de phase 1 et de phase 2⁹.

L'immunothérapie cellulaire, qui utilise des cellules souches, est également contrainte par les **lois bioéthiques qui encadrent fortement la recherche thérapeutique**. Les contraintes réglementaires sont alors similaires à celles évoquées pour l'ingénierie cellulaire.

Analyse AFOM

ATOUTS

Excellence académique
Tissu industriel important
Leaders mondiaux en vaccinologie (Sanofi, Mérieux) et en immuno-modulation (Stallergenes)

FAIBLESSES

Peu d'essais cliniques réalisés
Difficultés dans le transfert technologique
Manque de maturité des produits développés par les entreprises françaises

OPPORTUNITÉS

Impact significatif dans des aires thérapeutiques répondant à des besoins médicaux majeurs
Rôle en santé publique dans la prévention des pandémies et épidémies
Outils de la médecine personnalisée

MENACES

Freins éthiques et réglementaires pour l'immunothérapie cellulaire

9 – Renforcer la filière de l'immunothérapie en France, LEEM, 2012

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics

■ Afin d'améliorer le transfert technologique et de valoriser l'expertise académique française, **des équipes de transfert technologique (SATT) avec une expertise spécifique en immunologie** peuvent venir compléter le travail des pôles de compétitivité et des Instituts Carnot ;

■ Prioriser la recherche fondamentale afin de relever les défis technologiques est un autre facteur clé de succès, qui passe notamment par la **création de programmes ANR ciblés en immunothérapie**.

Aux entreprises

■ Pour que les produits des PME françaises gagnent en maturité, il est important que celles-ci puissent trouver des financements ou attirer les investisseurs. Pour ce faire, elles peuvent **accéder à des programmes européens et internationaux, effectuer des rapprochements**

industriels ou **demandeur un soutien public pour les preuves de concept** ;

■ L'oncologie est une aire thérapeutique qui apparaît prometteuse pour le développement de nouvelles modalités d'immunothérapie. De nombreuses entreprises se positionnent sur ce marché qui représente un levier de croissance important pour les PME françaises, notamment pour les entreprises de biotechnologies qui mettent en place des partenariats avec les grands groupes pharmaceutiques. L'oncologie est néanmoins une aire thérapeutique sur laquelle il existe une concurrence forte;

■ Les compétences françaises en matière de vaccination doivent également être renforcées, notamment pour assurer un bon positionnement sur la vaccination thérapeutique, approche qui comporte un fort potentiel d'innovation. Les entreprises françaises ont un rôle à jouer dans la valorisation d'innovations sur cette technologie.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

Les principaux centres de recherche et de formation qui travaillent en France sur le développement de nouvelles modalités d'immunothérapie sont **les Labex IRON et IGO, le CNRS, l'Inserm, l'Institut Curie, l'Institut Pasteur, l'Immunopôle de Marseille et l'Université Pierre et Marie Curie**.

L'Unité U932, « Immunité et Cancer » travaille au sein de l'Institut Curie en partenariat avec sept autres équipes de l'institut et trois du Centre d'immunologie de Marseille-Luminy sur la biologie des cellules dendritiques (cellules du système immunitaire). L'ensemble de ces équipes forme **le Labex DCBIOL** depuis 2013. L'immunologie est également un thème de formation dispensée par l'Institut.

Deux autres **Labex, IRON et IGO** contribuent à la recherche académique sur l'immunothérapie. Le Labex Iron s'attache au développement de radio pharmaceutiques innovants et leur transfert en clinique. Le Labex IGO explore quant à lui de nouvelles thérapies

contre le cancer ou le rejet de greffe, par une meilleure connaissance des mécanismes de réponses immunitaires de l'organisme.

Le CNRS dispose d'un laboratoire dédié, **le GICC** (Génétique Immunothérapie, Chimie et Cancer), rattaché à l'université François-Rabelais Tours, qui étudie les mécanismes de certaines maladies cancéreuses et immunologiques, afin de développer de nouvelles thérapies et de les personnaliser.

L'Inserm a également des unités spécialisées, comme par exemple l'U844 qui travaille sur des applications d'immunothérapie pour la polyarthrite rhumatoïde.

L'Immunologie figure en outre parmi les six grandes aires thérapeutiques explorées par les travaux de l'Institut Pasteur qui y consacre un département de recherche. Ce département rassemble **14 unités de recherche et 2 plates-formes techniques** qui cherchent à mettre au point de nouvelles stratégies thérapeutiques.

L'Unité de recherche « **Immunologie-Immunopathologie-Immunothérapie** » de l'Université Pierre et Marie Curie a pour objectif l'étude et le développe-

ment de l'immunologie translationnelle, reposant sur des études fondamentales mais aussi cliniques dont les maladies auto-immunes, les maladies infectieuses et le cancer. Une spécialité en immunologie est également proposée en Master 2.

L'immunopôle de Marseille est enfin une structure vouée à l'immunologie fondamentale et appliquée et son objectif est d'accélérer la découverte et le développement d'immunothérapies contre les cancers et les maladies inflammatoires.

Organismes d'interface

Les structures qui accompagnent les entreprises françaises dans leur développement sont en premier lieu les pôles de compétitivité. Sans être exhaustif, nous pouvons citer **Atlantpole Biothérapies, Medicen Paris Région, Alsace BioValley, Eurobiomed et Lyonbiopôle**. À titre d'exemple l'association **MabDesign** mise en place en novembre 2014 au sein du Lyonbiopôle vise à structurer et animer la filière industrielle française de l'anticorps thérapeutique et plus largement de l'immunothérapie. Elle est soutenue financièrement par Bpi France dans le cadre de la réponse à un appel « Filières Industrielles Stratégiques » issu du Programme d'Investissements d'Avenir. Le pôle Eurobiomed favorise également la mise en place d'écosystèmes innovants par le soutien à des acteurs régionaux comme, et c'est un exemple parmi d'autres, Marseille Immunopôle qui a été labellisé Fédération Hospitalo-Universitaire.

Au sein du **Consortium de Valorisation Thématique (CVT) AVISEAN**, un domaine de valorisation stratégique sur les anticorps thérapeutiques est en cours de création.

L'Institut Carnot Curie Cancer mobilise enfin des compétences en immunologie et développe des immunothérapies appliquées en oncologie en partenariat avec des acteurs industriels.

Grandes entreprises

Sanofi, bioMérieux et Pierre Fabre sont les principales grandes entreprises françaises qui développent des nouvelles modalités d'immunothérapie. Sanofi figure ainsi parmi les quatre leaders mondiaux de la vaccinologie. Le groupe pharmaceutique travaille depuis 2013 en étroite collaboration avec Transgène, une filiale de l'Institut Mérieux (bioMérieux), à la fabrication de produits d'immunothérapie, et notamment aux produits thérapeutiques de Transgene. Le Centre d'Immunologie Pierre Fabre développe pour sa part des programmes de recherche dans le domaine de l'immunothérapie des cancers, en particulier l'identification d'anticorps monoclonaux à visée thérapeutique. Ces recherches se concrétisent par le développement du premier anticorps thérapeutique du groupe.

Start-up et PME

Les *start-up* et PME françaises sont positionnées principalement sur les segments de la vaccination thérapeutique et des anticorps thérapeutiques. **Theravectys et Neovacs** développent ainsi des vaccins thérapeutiques. Issue de l'institut Pierre et Marie Curie, Neovacs est une société de biotechnologie qui a mis au point deux médicaments ciblant les pathologies auto-immunes. **Innate Pharma** travaille sur des anticorps innovants contre le cancer et les maladies inflammatoires.

L'aire thérapeutique que représente l'immuno-oncologie est également source d'intérêt des entreprises françaises comme les sociétés **Erytech** et **Proteogenix**.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Loisirs
& culture

Énergie,
Mobilité,
Numérique

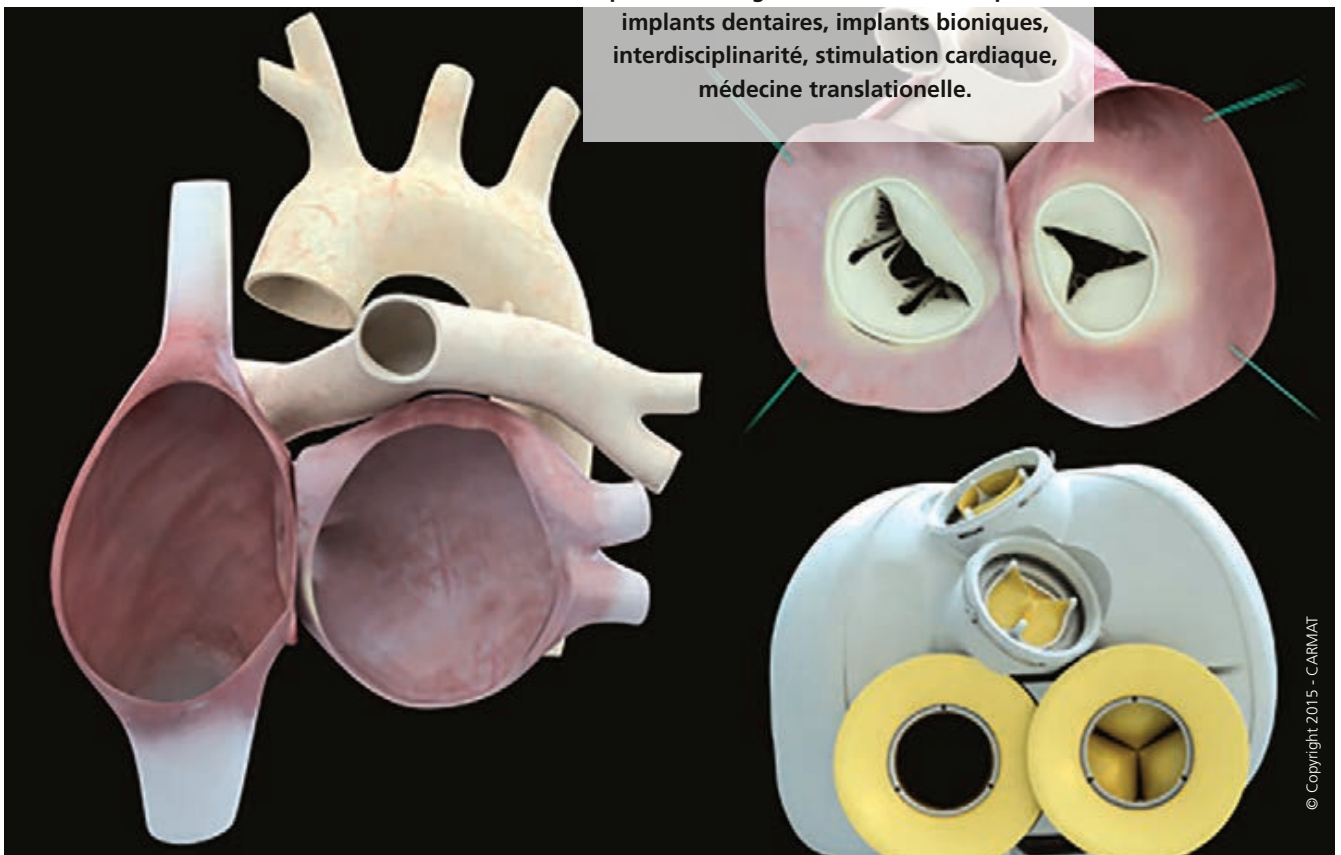
Environnement, Habitat,
SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, Sécurité

Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Dispositifs médicaux implantables actifs, prothèses, organes artificiels, orthopédie, implants dentaires, implants bioniques, interdisciplinarité, stimulation cardiaque, médecine translationnelle.



Définition et périmètre

Définition

Les dispositifs bio-embarqués sont des dispositifs médicaux actifs ou non, regroupant des systèmes aux technologies intégrées chez l'homme. Les principales fonctions des dispositifs embarqués sont de **contrôler, suppléer, remplacer une fonction déficiente** de l'organisme dans lequel ils sont implantés ou non. On distingue dans la grande famille des dispositifs bio-embarqués plusieurs types de dispositifs.

Les **dispositifs médicaux implantables** sont en premier lieu destinés à être implantés en totalité dans le corps humain ou à remplacer une surface épithéliale ou la surface de l'œil. Est également considéré comme dispositif implantable tout dispositif destiné à être introduit partiellement dans le corps humain par une intervention chirurgicale et qui demeure en place après l'intervention pendant une période d'au moins trente jours.

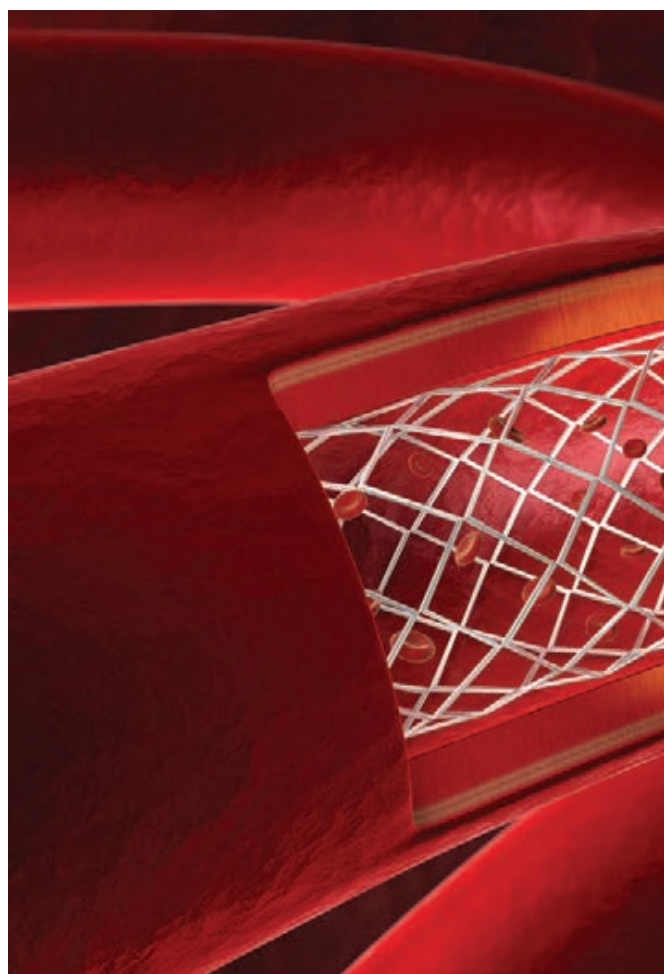
Les **prothèses implantables** sont ainsi des dispositifs implantables particulièrement destinés à remplacer un membre ou une articulation.

Les **implants prothétiques revêtus** sont quant à eux des dispositifs bio-embarqués destinés à remplacer tout ou partie d'un os ou une articulation osseuse.

Entrent également dans le champ du dispositif bio-embarqué, **les dispositifs médicaux implantables actifs**, conçus pour être implantés dans l'organisme pour suppléer ou contrôler une fonction déficiente par électrostimulation directe des organes ou structures en cause¹ (tels des stimulateurs cardiaques implantables ou des implants cochléaires). Entrent dans cette catégorie les organes artificiels implantés qui interagissent biologiquement avec l'organisme, comme par exemple le cœur artificiel implantable.

L'association de dispositifs médicaux dont certains sont implantables, également appelée système, peut également donner naissance à un ensemble portatif destiné à suppléer ou à contrôler une fonction déficiente d'un organe comme les poumons, le pancréas ou le tympan. Cet ensemble constitue un système de dispositifs bio-embarqués dont une partie

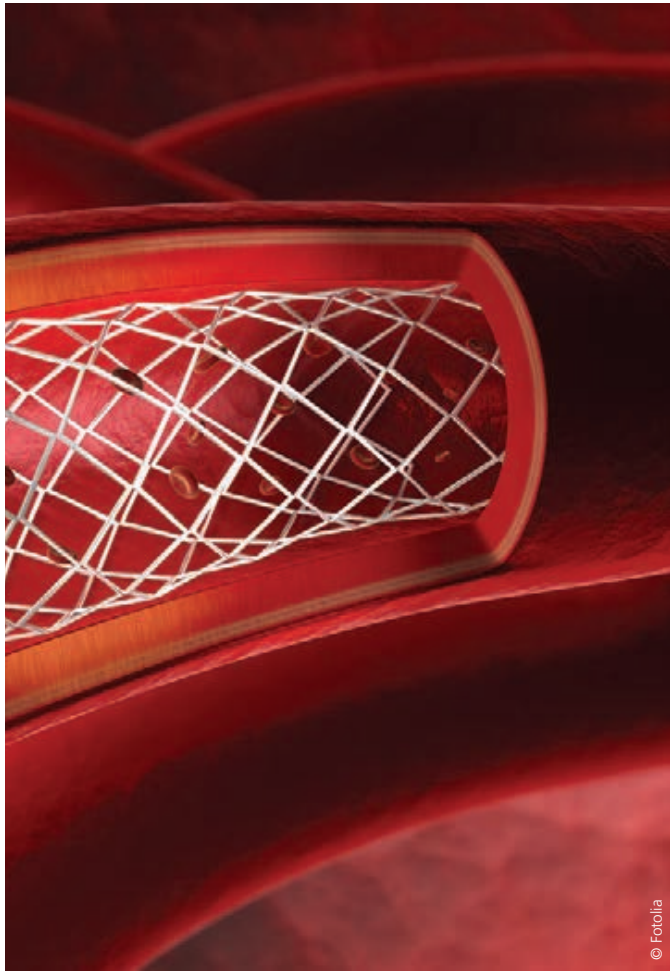
¹ – Dispositifs médicaux implantables actifs, réglementation harmonisée au niveau européen, DGE (avril 2015)



est située à l'extérieur du corps. Avec la miniaturisation des dispositifs et pour aspects pratiques et de confort de vie des patients, les avancées technologiques conduisent à introduire dans le corps l'ensemble de ces produits.

Un large périmètre d'applications

Les dispositifs bio-embarqués possèdent des applications dans tous les domaines de la santé, du traitement au monitoring en passant par la chirurgie, le sport, le diagnostic ou la E-santé. En ce qui concerne plus spécifiquement les traitements, les applications peuvent prendre la forme de dispositifs avec libération de médicaments (dispositifs intra-utérins, pompes à insuline, etc.), de neurostimulateurs, de cardiostimulateurs, d'organes artificiels (cœur, rétine), d'implants dentaires ou cochléaires, ou bien encore de dispositifs orthopédiques. Le monitoring permet également le suivi du métabolisme, dans le cas du diabète par exemple.



© Fotolia

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Des technologies répondant à des besoins croissants

Considérant le vieillissement de la population, l'augmentation du nombre de personnes souffrant de pathologies chroniques, nécessitant des prothèses et souffrant d'insuffisance fonctionnelle (motrice, cardiaque, hépatique, ect.) va augmenter significativement au cours des prochaines années, offrant **d'importantes perspectives de développement** pour les dispositifs bio embarqués.

L'interdisciplinarité comme force

Ces dispositifs résultent de plus d'une **forte interdisciplinarité** : compétences médicales, biologiques, chimiques, physiques (matériaux, mécanique et électronique), microtechniques. Les technologies

utilisées peuvent par exemple être issues des secteurs de l'aéronautique et des télécommunications. Les avancées technologiques de ces différents domaines vont donc fortement contribuer au développement des dispositifs embarqués, faisant du rapprochement et de la synergie entre ces différentes disciplines un élément clé pour la croissance du marché.

Atouts de la France

La France dispose de plus d'un bon positionnement dans ce secteur à cause notamment de son expertise historique.

Dans le domaine de la mécanique notamment en fonderie et en forgerie, elle a su profiter **d'excellentes compétences en chirurgie orthopédique** pour développer un savoir-faire particulier sur les prothèses. Près **d'un tiers de l'orthopédie mondiale est produite en France**, et 65 % de cette production est exportée². La France a su capitaliser sur ses compétences et se maintenir à la pointe de l'innovation sur cette brique de production industrielle. Positionnée sur le très prometteur secteur de l'impression 3D Osseomatrix est une entreprise qui a par exemple inventé un procédé de 3D *printing* direct de céramique biologique permettant de réaliser sur mesure des implants osseux minéraux. Grâce à cette innovation de rupture, la société figure parmi les seize lauréats du concours mondial « innovation 2030 ».

Les **compétences françaises dans le domaine de la simulation cardiaque** figurent également parmi les plus élevées au monde. Le premier cœur artificiel total a ainsi été développé par la société Carmat et demeure aujourd'hui le projet le plus avancé, avec trois patients implantés depuis 2013. L'IHU LYRIC de Bordeaux est également un élément clé du développement du secteur cardiovasculaire en France.

Dans le domaine de **l'audition, de la neurologie ou de la diabétologie**, elle dispose également d'un savoir-faire important à l'origine de projets novateurs qui peuvent déboucher sur des innovations majeures.

² – Données du Pôle des technologies médicales

Liens avec d'autres technologies clés

Le développement du marché des dispositifs bio-embarqués est fortement lié à d'autres technologies clés 2020 :

- **Cobotique et humain augmenté** : besoin de maîtriser les technologies et d'innover pour développer de nouveaux dispositifs bio-embarqués, notamment pour les organes-artificiels ou exosquelettes intelligents ;
- **Capteurs** : intégrés dans les dispositifs bio-embarqués pour permettre un suivi en temps réel de l'activité d'une fonction du patient ;
- **Exploitation des données de santé** : certains dispositifs bio-embarqués recueillent des données grâce à des capteurs ;
- **Ingénierie cellulaire et tissulaire** : la médecine régénératrice combine une partie synthétique avec des cellules différenciées/souches du patient. L'accélération des applications en ingénierie tissulaire peut contribuer par exemple avec les cellules souches à développer des solutions d'implants pour reconstruire le ménisque ou prévenir l'arthrose. Il en va de même pour le développement des *stents*, des valves cardiaques et des greffons, liés aux innovations de l'ingénierie tissulaire ;
- **Nanoélectronique** : la miniaturisation des systèmes d'alimentation de certains dispositifs est un enjeu important de leur efficacité et endurance ;
- **Microfluidique** : interface souvent indispensable entre le dispositif bio-embarqué et le corps humain ;
- **Fabrication additive** : mobilisée de plus en plus pour la fabrication de prothèses ;
- **Matériaux avancés** : permettent de renforcer la biocompatibilité de certains dispositifs ainsi que le meilleur relargage des dispositifs actifs.

Les marchés

Un marché mondial en forte croissance

Les projections de croissance sur le marché des dispositifs bio-embarqués montrent une **forte croissance** d'ici 2020. Estimé à 58 milliards de dollars en 2014, le marché mondial des dispositifs bio-embarqués devrait atteindre **116 milliards de dollars à l'horizon 2020**, sur la base d'une **croissance moyenne annuelle de 10,3 %**.

Cette forte croissance s'explique notamment par l'augmentation de la part âgée de la population ainsi que des prévalences des pathologies cardiaques, orthopédiques et de la colonne vertébrales associées. La combinaison de ces facteurs devrait fortement influencer sur la demande mondiale. Les États-Unis dominent et devraient continuer de dominer le marché, suivis par l'Europe³⁴. Ces deux marchés comptent à eux seuls pour 70 % du marché mondial des dispositifs bio-embarqués en 2013. **Le marché le plus prometteur à l'horizon 2020 est pourtant celui de l'Asie Pacifique** qui devrait représenter 20 % de parts du marché en 2020. Cette forte dynamique de croissance dans la région s'explique notamment par l'augmentation à la fois des maladies chroniques mais aussi du pouvoir d'achat des patients.



Des segments particulièrement porteurs

- Le marché mondial des prothèses est le segment le plus important et comprend de nombreux sous-segments : les implants et prothèses dentaires, mammaires, cardiaques, orthopédiques, etc. Le marché total des prothèses est également important en France où chaque année sont implantés 11 millions de prothèses dentaires, plus de 500 000 prothèses mammaires, 140 000 prothèses de hanche, 40 000 prothèses de genou et près de 200 000 *stents* dont la moitié de *stents* délivrant une molécule thérapeutique. **En 2050, on estime qu'un Français sur deux vivra avec une prothèse⁵.**

3 – *Global Bio-implants Market (Types, and geography) - Size, Share, Global Trends, Company Profiles, Demand, Insights, Analysis, Research, Report, Opportunities, Segmentation and Forecast, 2013 – 2020*, Research and Markets, 2014

4 – *Global Bio-implants Market (Types, and geography) - Size, Share, Global Trends, Company Profiles, Demand, Insights, Analysis, Research, Report, Opportunities, Segmentation and Forecast, 2013 – 2020*, Research and Markets, 2014

5 – Les dispositifs médicaux implantables « Comment concilier sécurité et innovation ? », Académie nationale de pharmacie, août 2013

Si le marché total est difficile à évaluer, on peut noter que le principal sous-segment est celui des implants et prothèses orthopédiques, dont le marché est estimé à 29,2 milliards de dollars en 2012. Sur une base de croissance annuelle moyenne de 4,9 %, il devrait atteindre 42,8 milliards en 2020⁶. Les entreprises leaders de ce domaine sont américaines (Johnson & Johnson, Zimmer Holdings et Strykers). La position de la France est cependant intéressante sur ce sous-segment puisque 21 entreprises françaises figurent parmi les 54 principales que compte le marché⁷.

■ Le marché mondial des organes artificiels a quant à lui particulièrement bénéficié **d'une multitude d'avancées technologiques** au cours des deux dernières décennies. Afin de répondre aux besoins non satisfaits, le marché global devrait atteindre les **39 milliards de dollars d'ici 2020** avec une **croissance annuelle de 9,3 %** entre 2014 et 2020⁸.

Le marché mondial des organes artificiels est dominé par les États-Unis, suivi de l'Europe. Biomet et Medtronic figurent au rang des entreprises leaders du marché.⁹ **L'Asie Pacifique est la région où le marché se développe le plus rapidement** avec une croissance moyenne annuelle estimée à 11 % entre 2014 et 2020, du fait notamment de l'amélioration des systèmes de soins.

En 2013, le marché mondial était dominé par le segment du rein artificiel qui représentait un revenu de près de 12 milliards de dollars tandis que le segment dont la croissance annuelle estimée est la plus forte est celui du foie artificiel (11 % entre 2014 et 2020).

Parmi les avancées technologiques les plus importantes, l'implantation intégrale du premier organe artificiel est à noter. Il s'agit d'un cœur artificiel développé par la société française Carmat et implanté pour la première fois en décembre 2013. Les industriels se concentrent actuellement sur le développement d'implants

bioniques comme des bio-poumons ou des pancréas artificiels pour des pathologies qui ne peuvent être guéries par des traitements alternatifs¹⁰.

■ Selon les estimations, le marché mondial des dispositifs médicaux implantables actifs devrait également connaître une forte croissance et atteindre près de **25 milliards de dollars en 2016** (sur la base d'une **croissance annuelle moyenne de 8,9 %** entre 2010 et 2016).

Si le marché est actuellement dominé par les implants cardiaques et les implants cochléaires, ce sont les neuro-stimulateurs et les pompes à médicaments implantables qui observent les croissances de marché les plus dynamiques (avec des croissances annuelles moyennes respectives de 18,2 %, 10,5 % et 10,5 % entre 2010 et 2016)¹¹. Ce segment **profite des nombreuses innovations technologiques** apparues ces dernières années, venues compléter les traditionnels pacemakers. Les entreprises américaines Medtronic et Johnson & Johnson comptent parmi les leaders du marché mondial des dispositifs médicaux implantables actifs.

Les défis technologiques à relever

Miniaturisation des dispositifs

Un défi technologique important pour le développement des dispositifs bio-embarqués concerne la miniaturisation, relevant dans certains cas tant des nanotechnologies que de la robotique. La réduction de la taille des dispositifs entraîne également des enjeux portant sur la miniaturisation des sources d'énergie alimentant les dispositifs afin de pouvoir augmenter leur durée de vie. C'est tout particulièrement le cas des dispositifs médicaux implantés actifs, qui ont besoin de sources d'énergies fiables sur le long terme. Le développement de biopiles inépuisables capables de générer de l'électricité à partir de glucose et d'oxygène présents dans l'organisme sont un exemple de technologies en développement prometteuses. La France s'avère en bonne position pour relever ce défi avec la réalisation du premier essai réussi sur un mammifère par une équipe de chercheurs en 2012.

6 – Orthopedic Devices Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2013 - 2019", Transparency Market Research, 2015

7 – Le marché des dispositifs médicaux implantables analyse et recommandations, aie Franche-Comté, 2011

8 – Global Artificial Organ & Bionics Market By Product (Artificial Heart, Liver, Kidney, Pancreas, Bionic Limbs, Hear Valves, Cardiac, Vision), By Technology (Mechanical, Electronic) Grand View Research, Inc., June 2014

9 – Medical Bionic Implant /Artificial Organs Market - (Vision Bionics/Bionic Eye, Brain Bionics, Heart Bionics/Artificial Heart, Orthopedic Bionics and Ear Bionics) – Trends and Global Forecasts to 2017

10 – Artificial Vital Organs and Medical Bionics Market (Artificial Heart, Kidney, Liver, Pancreas & Lungs, Ear Bionics, Vision Bionics, Exoskeletons, Bionic Limbs, Brain Bionics and Cardiac Bionics) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2012 - 2018

11 – *Microelectronic Medical Implants: Products, Technologies & Opportunities*, BBC Research 2011

Bio-stabilité et biocompatibilité

La bio-stabilité et la biocompatibilité est un autre défi technologique essentiel pour le développement des dispositifs bio embarqués afin d'annihiler les possibilités de rejet. Des systèmes résorbables ne laissant aucun corps étranger quelques mois ou années après leur mise en place peuvent être une solution, ils sont développés notamment dans le cadre de *stents* délivrant une molécule thérapeutique. Le développement de bio-matériaux qui empêcheraient tout rejet est un facteur qui pourrait porter la croissance du marché des dispositifs bio-embarqués.

Les techniques de la fabrication additive permettent de plus la fabrication d'une gamme de plus en plus vaste de prothèses et d'implants et ouvrent les perspectives de développement des dispositifs bio-embarqués. Sur ces techniques, la bio-compatibilité du produit fini demeure cependant un défi technologique majeur.

Sécurité des dispositifs

Enfin, comme pour tout objet partageant des données de santé, la sécurité des dispositifs bio-embarqués est un enjeu essentiel qu'il apparaît important de renforcer. Comme l'a rappelé la FDA américaine, certains dispositifs et logiciels qui leur sont associés présentent en effet des failles de sécurité et sont susceptibles de faire l'objet de cyber-attaques (exemple des *pacemakers*).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Positionner des leaders industriels

Si la France bénéficie d'une plutôt bonne position concernant les dispositifs bio-embarqués, elle manque de grands acteurs industriels spécialisés dans le domaine, et ce malgré un tissu industriel important d'entreprises des dispositifs médicaux (PME, TPE). Les pays européens concurrents comme l'Allemagne ou la Suisse disposent par exemple d'acteurs industriels importants (NobelBiocare et Straumann en Suisse).

La fabrication française reste de ce fait cantonnée à la production de petites séries alors que le marché peut prétendre à une production plus conséquente.

Structurer un secteur peu intégré

Le secteur français des dispositifs bio-embarqués apparaît également peu intégré et structuré ce qui constitue un enjeu particulier du fait notamment de

la multidisciplinarité nécessaire au développement de ce type de dispositifs. La création du **Pôle des Technologies Médicales (PTM)** est un pas encourageant vers la structuration. L'association regroupe en effet entreprises et laboratoires du territoire français et a pour vocation de développer la visibilité des compétences et des savoir-faire locaux et de faciliter l'innovation.

Les enjeux réglementaires

Les cadres réglementaires qui régulent tant l'accès au marché que le remboursement des dispositifs bio embarqués sont amenés à évoluer, notamment en ce qui concerne les dispositifs médicaux implantables. Suite au scandale sanitaire provoqué par la découverte en 2010 d'implants mammaires non conformes, le renforcement de l'évaluation de la sécurité et de la traçabilité des DMI est devenu un élément d'intérêt. Si les propositions de règlements présentées par la commission européenne en 2012 en remplacement de la directive 93/42/CEE n'ont à ce jour pas été appliquées, la nécessité d'adapter les réglementations aux enjeux soulevés par l'évolution des dispositifs bio-embarqués restera d'actualité dans les années à venir.

L'accès au marché pour les industriels peut en outre être freiné par un **manque d'homogénéité des cadres législatifs.** La réglementation est en effet hétérogène selon les dispositifs et peu lisible pour les acteurs des dispositifs bio-embarqués. L'unification des procédures de certification comme la formalisation de nomenclatures au sein des hôpitaux pour financer l'achat de prototypes innovants peuvent ainsi par exemple faciliter la compréhension et l'application de législations parfois complexes. .

À l'échelle européenne comme internationale, **le manque d'harmonisation entre les différentes législations** est un facteur qui contraint également l'accès aux marchés pour les industriels, du fait notamment de différences importantes entre les États-Unis et l'Europe.

Enfin, pour ce qui est plus spécifiquement des organes artificiels et des dispositifs médicaux implantables, **la réglementation actuelle qui régule les essais cliniques est très difficile à respecter pour les industriels,** ce qui représente un frein à leur réalisation.

Analyse AFOM

ATOUTS

Excellence chirurgicale dont orthopédique, cardiaque, auditive, etc.

Très bon positionnement français à l'échelle internationale sur la production orthopédique porté par la qualité de l'innovation

Position forte sur la stimulation cardiaque et le développement de cœurs artificiels (Carmat fait figure de leader sur ce segment)

FAIBLESSES

Manque de structuration de la filière

Peu de grands acteurs industriels d'envergure internationale

OPPORTUNITÉS

Forte croissance de la demande et du marché du fait notamment des évolutions démographiques

MENACES

Concurrence européenne (Suisse, Allemagne) et des États-Unis

Évolution de la réglementation

Facteurs clés de succès et recommandations

Renforcer l'interdisciplinarité

L'interdisciplinarité étant un élément essentiel du développement des dispositifs bio embarqués, son renforcement sur l'ensemble de la filière apparaît nécessaire. Cette consolidation peut passer par la **création de plateformes mutualisées innovantes**, pour le développement et la démonstration notamment.

Structurer la filière française

Le développement de **centres d'excellence en médecine translationnelle** dans ces domaines doit également être favorisé afin de renforcer la conception et accompagner au mieux les PME.

Il est important qu'elles puissent atteindre une taille critique suffisante pour jouer un rôle sur le

marché international. Les pouvoirs publics peuvent en ce sens également les soutenir afin de structurer la filière. Le soutien aux entreprises innovantes peut également passer par le **renfort des financements et aides apportés à la recherche et au développement**.

Organiser une réflexion sur la réglementation

Enfin, les PME des dispositifs médicaux ont un rôle à jouer dans l'organisation d'une réflexion avec l'ensemble des acteurs afin d'adapter les exigences réglementaires qui contraignent fortement la réalisation d'essais cliniques sur les organes artificiels et les dispositifs implantables.

Acteurs clés

Acteurs académiques :

Les centres de recherches qui contribuent, de manière plus ou moins directe, au développement des dispositifs bio embarqués ont pour particularité d'être des centres multidisciplinaires. Sans être exhaustifs, nous pouvons citer deux équipes particulièrement actives au sein du CNRS, **l'INSIS** qui s'intéresse en particulier à l'ingénierie de la santé et du vivant, et le **BMBI** orienté sur la mécanique du vivant qui sont particulièrement actives. **L'institut hospitalo-universitaire (IHU)** de rythmologie et modélisation cardiaque (**LYRIC**), à Bordeaux est quant à lui spécialisé dans l'étude, le diagnostic et le traitement des dysfonctions électriques du cœur. **D'autres IHU travaillent également sur des projets de dispositifs médicaux bios embarqués pour suppléer des fonctions permettant aux patients plus d'autonomie. L'institut de la vision (Labex)** accueille dix-sept équipes de recherche travaillant sur les différentes problématiques de la vision. Autre centre de recherche pluridisciplinaire, **l'institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (IRPHE), à Marseille** contribue au développement des dispositifs bio-embarqués à travers ses travaux sur la biomécanique notamment.

Acteurs industriels :

Les acteurs qui forment le tissu industriel français des dispositifs bio-embarqués sont répartis selon trois catégories : les PME et TPE, les ETI et les groupements d'industriels.

■ **PME/TPE**: Le tissu industriel français est essentiellement composé de TPE et PME qui développent des solutions innovantes dans toutes les applications des dispositifs embarqués. Certaines sont développées à l'international et sont fortement spécialisées sur des domaines précis. C'est le cas de **Carmat**, leader mondial de son domaine et première entreprise à avoir implanté intégralement un cœur artificiel. **Pixium Vision** développe de son côté des systèmes bioniques de restauration de la vision, **Neurelec** des implants cochléaires, **Tornier** des implants chirurgicaux ortho-

pédiques et **Adocia** des pompes à médicaments. **Osseomatrix** est enfin une entreprise qui fabrique des prothèses osseuses en céramique par un procédé innovant d'impression 3D ;

■ **ETI**: Outre les PME et TPE, le tissu industriel compte également quelques ETI, positionnées sur le secteur historique de l'orthopédie pour lequel la France dispose de compétence spécifiques. Des entreprises comme **Ceraver** ou **Orhtoline France** comptent parmi les principales ;

■ **Groupement d'industriels** : Enfin, **l'Association PTM** regroupe industriels, chercheurs et professionnels de santé dans le but de développer l'innovation technologiques des dispositifs médicaux, prothèses et dispositifs médicaux implantables en tête.

Organismes d'interface et de soutien

Même s'il n'existe pas de structure uniquement dédiée, plusieurs pôles de compétitivité aident le développement des entreprises françaises des dispositifs bio-embarqués. On peut citer pour illustrer un exemple d'engagement de certains pôles, le cas de **LyonBio-pole**, dédié à la lutte contre les maladies humaines et les cancers, **Minalogic**, dédié aux micro-nanotechnologies et aux logiciels. De manière plus spécifique, **le pôle européen de la céramique** soutien le développement d'entreprises spécialisées dans les prothèses, implants, matériaux de comblement osseux, filtres et émaux qui utilisent ce matériau.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

32 Technologies d'imagerie pour la santé

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE , Sécurité
Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Imagerie fonctionnelle ; interventionnelle ; structurelle ; télé-imagerie ; export ; prévention ; diagnostic précoce ; suivi thérapeutique ; médecine personnalisée ; images multimodales ; traceurs ; équipements ; logiciels ; stockage des données.



Définition et périmètre

Définition

L'imagerie pour la santé regroupe l'ensemble des techniques utilisées pour l'**acquisition**, le **traitement** et la **restitution d'images** à toutes les échelles du vivant, *in vivo* ou *in vitro*, pour des applications médicales.

L'imagerie est réalisée à partir de différents phénomènes physiques et repose sur plusieurs modalités :

- Les rayons X ;
- L'optique ;
- Les ultrasons ;
- La résonance magnétique ;
- La tomographie par émission de positons (TEP) et la tomographie d'émission monophotonique (SPECT) ;
- Les modalités émergentes : magnétoencéphalographie - MEG, imagerie de résonance paramagnétique RPE, imagerie de représentation des particules magnétiques MPI, etc.

L'imagerie est **utilisée tout au long du parcours de santé** : en prévention, pour le diagnostic, pour le suivi thérapeutique et en intervention (chirurgie/thérapie assistée par l'image). L'imagerie cellulaire et l'imagerie moléculaire sont quant à elles utilisées pour la recherche biomédicale et pharmaceutique.

L'imagerie relève de quatre champs technologiques principaux :

- Les **systèmes d'émission et de détection** dont l'amélioration permet d'augmenter la sensibilité et les résolutions spatiales et temporelle ;
- Les technologies de **traitement du signal et de l'image** qui permettent notamment de superposer des images provenant de plusieurs sources et d'obtenir une vision complète et quasi réelle du patient ;
- Les **agents d'imagerie ou de contraste** (traceurs) qui permettent de fournir des images spécifiques ;
- **L'exploitation des données numériques de santé** avec les PACS qui permettent de constituer un suivi numérique du dossier patient.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Des technologies répondant à des besoins mondiaux croissants en santé

L'imagerie pour la santé constitue un marché dynamique qui devrait continuer de croître de manière importante à l'horizon 2020. Il doit en effet permettre de **répondre à des besoins mondiaux croissants** du fait notamment de la place toujours grandissante des images dans le diagnostic et le traitement des maladies. Ces besoins sont particulièrement marqués en ce qui concerne l'amélioration de la prévention et de la réalisation de diagnostics plus précoces (**leviers importants de la maîtrise des dépenses de santé**) mais également dans le cadre de suivi thérapeutique personnalisé¹.

L'imagerie médicale devrait en ce sens permettre d'apporter de plus en plus d'informations indépendantes qui complètent l'examen du patient et s'avère ainsi particulièrement adaptée à la médecine personnalisée, identifiée comme l'une des grandes tendances technologique du secteur de la santé.

L'imagerie médicale est de plus **adaptée aux dispositifs de télémédecine**, eux aussi en plein essor, bien qu'apparue fonctionnellement depuis plus de 10 ans. Ainsi par exemple les modalités d'acquisition et les technologies de partage et d'archivage des données d'imagerie de type PACS sont mobilisées dans le cadre de Permanences de soins (PDS) en imagerie médicale. Sur ce modèle, plusieurs expériences ont été conduites avec des fonds publics notamment dans la prise en charge de l'accident vasculaire cérébral (AVC) ou du suivi de pathologies chroniques (diabète), ces dernières résultant des pratiques et de l'articulation des nombreuses disciplines et professions de santé..

L'Union Européenne investit par ailleurs dans les technologies de l'imagerie pour la santé, à travers notamment le programme Horizon 2020 qui finance l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), institut de recherche collaboratif implanté en France.

1 – *Ibid*

Atouts de la France

Bien qu'il n'y ait pas de *leader* français en équipement d'imagerie, le positionnement de la France en matière d'imagerie pour la santé est favorable.

La recherche académique et clinique est en pleine structuration et son dynamisme profite d'un nombre important de chercheurs, de publications scientifiques, mais aussi de structures dédiées (4 IHU ; 1 IRT ; 16 Equipex ; 11 Labex). Deux réseaux nationaux de plates-formes d'imagerie (France Life Imaging et France Bio Imaging) ambitionnent en outre de favoriser la coopération scientifique et les formations.

La France dispose également d'un **bon positionnement industriel** sur les modalités d'ultrasons (*leadership* mondial de SuperSonic ou Vermon), sur l'imagerie optique, la radiologie du rachis à très faible dose irradiante (MaunaKea Technologie), l'endo-microscopie (Medtech) ainsi que pour le traitement de l'image. La position de **Guerbet** est également à noter puisque l'entreprise fait partie des *leaders* mondiaux et domine le marché européen des agents de contraste avec 25 % de parts de marché. Enfin, la filière industrielle de l'imagerie médicale exporte fortement (44 % du chiffre d'affaires des entreprises, toutes technologies confondues).

Ce positionnement est conforté par **l'accompagnement des pouvoirs publics** à travers une stratégie nationale de déploiement de la télémédecine (décret du 19 octobre 2010 relatif à la télémédecine), dont trois des cinq chantiers prioritaires sont impactant pour l'imagerie :

- permanence des soins en imagerie médicale
- prise en charge des accidents vasculaires cérébraux (Télé AVC)
- santé des personnes détenues

La mise en œuvre de cette stratégie contribue grandement à l'essor de l'imagerie pour la santé.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché des technologies de l'imagerie pour la santé dépend étroitement du développement de technologies qu'elle intègre dans ses systèmes (nanoélectronique et capteurs) mais également de technologies dont certaines de ses applications relèvent

directement (exploitation des données numériques de santé). Les technologies de l'imagerie servent enfin à la croissance des marchés d'autres technologies clés (fabrication additive, dispositifs bio-embarqués, modélisation, simulation et ingénierie numérique) :

■ **Exploitation numérique des données de santé** : les technologies de traitement du signal et de l'image demandent des vitesses d'acquisition et/ou de traitement de plus en plus rapides et des capacités grandissantes de traitement des flots de données et de leur stockage, en particulier pour l'imagerie biologique qui produit plus de données que l'imagerie médicale. Les PACS constituent en outre une application directe de l'exploitation numérique des données de santé ;

■ **Nanoélectronique** : la miniaturisation des systèmes d'imagerie permet de les rendre moins invasifs ;

■ **Capteurs** : les technologies de l'imagerie pour la santé comprennent des biocapteurs ;

■ **Dispositifs bio embarqués** : obtenir une image d'organes, tissus, etc. peut permettre de développer un dispositif embarqué. Ce développement s'adapte particulièrement bien aux technologies de la **fabrication additive** ;

■ **Modélisation, simulation et ingénierie numérique** : les techniques d'imagerie permettent de fournir les données nécessaires à la modélisation par exemple d'organes ou de tissus.

Les marchés

Un marché mondial en croissance

Estimé à 32,3 milliards de dollars en 2014, le marché mondial de l'imagerie pour la santé devrait croître, selon les estimations, sur une base annuelle de **5,4 % à 7 %** d'ici à 2020. Cela signifie que le marché devrait atteindre **entre 35 et 49 milliards de dollars**, représentant une **croissance considérable depuis 2012**²³. Bien que l'Europe et l'Amérique du Nord soient les marchés les plus importants et ceux qui adoptent le plus rapidement les nouvelles technologies d'imagerie, c'est le marché asiatique qui devrait enregistrer les plus forts taux de croissance.

2 – Chiffres de *HealthImaging*

3 – *Medical Imaging devices : A global market overview*, Research and markets, 2013

Des segments dynamisés par l'essor des BRIC et de l'informatique médicale

Le marché de l'imagerie pour la santé est segmenté entre des **marchés traditionnels**, à savoir le marché des équipements et le marché des agents d'imagerie, et un **segment plus récent en plein développement** : le marché de l'informatique médicale⁴.

■ Le marché des équipements de l'imagerie pour la santé est dominé à l'échelle mondiale par des grands groupes tels que Philips et Siemens, qui totalisent à eux seuls 78 % des revenus. Le tissu industriel français est en effet principalement composé de PME comme Mauna Kea Technologies, EOS Imaging, Supersonic Imagine. Les États-Unis concentrent 25 % des parts de marchés devant l'Europe qui représente 19 % de ce même marché.

Les marchés des BRIC apparaissent particulièrement prometteurs et dynamiques, notamment les marchés chinois et indien, qui acquièrent un grand nombre d'équipements du fait de la construction de nouvelles infrastructures hospitalières. Le marché indien devrait ainsi atteindre 1,27 milliard de dollars en 2017. L'échographie est enfin le sous-segment le plus porteur du marché mondial des équipements de l'imagerie avec 6 milliards de dollars de revenus estimés en 2012, dont 240 millions pour la France qui ne dispose pas d'entreprise *leader* positionnée sur ce sous-segment⁵.

■ Le marché des agents d'imagerie et de contraste est quant à lui concentré autour de cinq principaux acteurs mondiaux (GE Healthcare, Bayer, Bracco, Mallinckrodt et le français Guerbet) et est principalement porté par les États-Unis qui concentrent 46 % des revenus⁶. Ce segment est dominé par les agents de contraste qui représentent 6,2 milliards de dollars en 2012 ainsi que par les radios pharmaceutiques estimés à 3,8 milliards de dollars.

■ Le marché mondial de l'informatique médicale, qui comprend notamment les systèmes d'archivage, de gestion et d'échange d'images, représente environ 5 milliards de dollars en 2015. Ce segment est

principalement porté par le PACS radiologique (ou dossier patient de radiologie) dont **la progression annuelle est estimée à 10 %**⁷. À l'échelle mondiale, les PACS sont en grande majorité produits par cinq entreprises internationales (GE Healthcare, Philips Healthcare, Fuji Film, Siemens Healthcare et Agfa-Gevaert). Parmi ces leaders, 4 entreprises sont européennes alors que les États-Unis dominent largement le marché mondial. Le marché européen enregistrera en outre une croissance plus dynamique que le marché américain à l'horizon 2020. Si aucune entreprise française ne figure parmi les leaders mondiaux, le pays se place en deuxième position au niveau européen derrière l'Allemagne en termes de parts de marché et détient le plus fort taux de pénétration ces dernières années.

Les défis technologiques à relever

Interopérabilité des systèmes

L'imagerie de santé doit encore connaître dans les prochaines années des évolutions technologiques afin de répondre à un certain nombre de défis comme la nécessité de rendre les dispositifs interopérables, ce qui passe notamment par la standardisation de la communication entre les différents systèmes. La complexité des contenus échangés impose donc de repenser l'architecture des moyens de communication entre les équipements d'imagerie médicale et les systèmes concernés par la gestion et les communications des informations qu'ils délivrent.

Analyse et stockage de données massives

L'amélioration de l'analyse, du traitement et du stockage des données est également un défi essentiel, qui nécessite de faire évoluer la sensibilité et la spécificité des dispositifs. L'amélioration de l'analyse du signal et des images combinées sur grandes populations est dans ce cadre un enjeu technologique clé, au même titre que le stockage et l'analyse des données sur l'imagerie biologique, qui produit plus de données que l'imagerie médicale.

Couplage de différentes modalités

Il apparaît également nécessaire de combiner différentes technologies et modalités afin d'assurer une meilleure efficacité des systèmes. Le couplage des

4 – Comme le précise le rapport PIPAME sur l'Imagerie médicale du futur, les données disponibles sur le marché sont trop disparates pour permettre d'évaluer la répartition des segments de manière fiable.

5 – *Great Growth Potential for Medical Imaging Systems*, Frost & Sullivan, 2012

6 – *Imagerie médicale du futur*, Ministère du Redressement Productif - PIPAME, 2013

7 – *Ibid*

modalités d'imagerie comme celles de diagnostic et d'intervention peut par exemple comprendre les multi-modalités issues du couplage IRM-TEP.

Amélioration des protocoles et standards scientifiques

Enfin, ces défis technologiques nécessitent parfois de lever certains verrous qui ne relèvent pas uniquement du champ scientifique, comme par exemple lorsqu'il s'agit de répondre à des enjeux relevant de l'amélioration des protocoles et des standards.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Consolider le socle industriel

Le principal défi commercial à relever pour le secteur français de l'imagerie pour la santé est de bâtir un socle industriel suffisamment important pour valoriser les innovations. Le tissu industriel français est en effet composé essentiellement de PME et de TPE mais manque de grands groupes d'envergure internationale. Les entreprises françaises, si elles arrivent à exporter à l'étranger, connaissent de plus des difficultés à s'appuyer sur le marché intérieur. Sur certains segments (médecine nucléaire et électrophysiologie notamment) sont ainsi privilégiées les solutions développées par les grands industriels au détriment de celles apportées par les PME⁸.

Renforcer l'équipement des structures hospitalières françaises

De plus, si la facilité d'accès à l'imagerie est de plus en plus importante, un certain nombre de structures hospitalières restent encore à équiper en France, alors que les hôpitaux sont des vecteurs de premier choix pour la diffusion des innovations médicales. La France dispose

ainsi d'un taux d'équipement en dispositifs d'imagerie médicale dédiés aux soins inférieur à la moyenne des pays de l'OCDE⁹. Faciliter l'achat de solutions d'imagerie par les hôpitaux est donc un enjeu pour les industriels français afin d'améliorer leur accès au marché national.

Faire face à la concurrence internationale

Enfin, la concurrence de nouveaux entrants sur le marché de l'imagerie pour la santé est un autre défi commercial auquel la France devra faire face. Le développement des entreprises chinoises et japonaises telles que Fuji Film ou Fujitsu est par exemple une menace de plus en plus importante pour les entreprises françaises dans le segment de l'informatique médicale pour l'imagerie.

Les enjeux réglementaires

L'imagerie de santé est parfois limitée par des contraintes réglementaires, françaises et européennes, qui sont relatives à la fois aux **dispositifs médicaux** (pour les équipements et logiciels) mais également aux **médicaments** (pour les agents de contraste). Cette différence entre les procédures réglementaires peut induire des difficultés pour faire coïncider le cycle de développement d'un équipement avec la molécule qui lui est associée (le cycle de développement d'un produit est sensiblement plus long que celui d'un équipement)

Les exigences réglementaires pour le **remboursement et la prise en charge** des dispositifs d'imagerie sont de plus très variables selon les équipements. A noter, le tarif bas des actes liés aux dispositifs d'imagerie peut réduire la capacité des hôpitaux à acheter, freinant ainsi potentiellement l'accès des industriels au marché français. Ajouté à cela, le code des marchés publics qui ne favorise pas l'achat innovant par les hôpitaux.

8 – *Imagerie médicale du futur*, Ministère du Redressement Productif - PIPAME, 2013

9 – *Ibid*

Analyse AFOM

ATOUTS

Bon positionnement de la France avec la visibilité internationale de plusieurs équipementiers (Super Sonic Imagine et Vermon). Sur ce segment il manque toutefois d'entreprises en position de *leader*

Savoir-faire industriel unique sur certains segments (modalités d'ultrasons imagerie optique, radiologie du rachis à très faible dose irradiante, l'endo-microscopie, traitement de l'image)

Excellence académique

Leader européen des agents de contraste (Guerbet)

Tissu industriel dynamique à l'export

FAIBLESSES

Manque de structuration sur l'ensemble de la filière

La réglementation trop hétérogène freine le développement

OPPORTUNITÉS

Diversité des applications

Apparition de nouveaux besoins dans des secteurs porteurs

MENACES

Très forte concurrence internationale portée par des entreprises leaders du marché

Arrivée de nouveaux entrants via le développement des marchés chinois et japonais

Facteurs clés de succès et recommandations

Il est essentiel de penser l'imagerie de santé comme un vecteur d'économies de santé dans le cadre de la *médecine personnalisée*¹⁰. Il est donc particulièrement important pour les entreprises françaises d'être impliquées dans la structuration de la filière ainsi que de pouvoir valoriser leurs compétences et être moteur d'innovation.

¹⁰ – *Imagerie médicale du futur*, Ministère du Redressement Productif - PIPAME, 2013

Promouvoir les compétences industrielles françaises

- Sur le plan industriel, des actions de promotion des compétences industrielles pourraient être renforcées. La filière française est en effet fragmentée et se caractérise par une absence de *leader*, notamment sur le secteur de l'équipement ;
- Le soutien aux PME pour qu'elles atteignent une taille critique, des alliances et des rapprochements

entre PME et ETI seront ainsi certainement nécessaires pour **structurer la filière** et porter des projets d'envergure.

Stimuler la demande intérieure et extérieure

- Les pouvoirs publics doivent aussi **stimuler la demande** en accompagnant les PME nationales dans la pénétration du marché intérieur, auprès des structures hospitalières en particulier ;
- Il est également important de renforcer leur présence sur les marchés extérieurs concurrents déjà établis (États-Unis, Allemagne, Pays-Bas) comme en développement (Japon, Chine).

Renforcer la recherche partenariale

- **Le renforcement de l'innovation et de la recherche partenariale technologique** est un autre facteur clé de succès. Les moyens déjà mis en place pour favoriser des collaborations entre secteurs public et privé (Programme d'investissements d'avenir, création des Sociétés d'Accélération de Transfert Technologique) doivent être complétés par un meilleur accès au financement pour des collaborations entre partenaires académiques et des entreprises ;
- Afin de saisir les opportunités liées à l'émergence de nouveaux besoins dans des secteurs porteurs, les pouvoirs publics peuvent enfin **favoriser le transfert technologique**.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

Au sein des organismes de recherche, il est possible de distinguer les structures dédiées à l'imagerie de celles actives en santé, et ce afin de saisir avec plus de finesse la structuration de l'ensemble des acteurs académiques des technologies de l'imagerie pour la santé.

- Organismes de recherche dédiés à l'imagerie : La création de deux infrastructures nationales de recherche, **France Life Imaging** et **France Bio Imaging**, est un projet important financé dans le cadre des investissements d'avenir puisque ces infrastructures ont pour objectif de coordonner à l'échelle nationale les activités de recherche en imagerie afin de mutualiser et valoriser les compétences académiques. A ces infrastructures s'ajoutent des Labex : **TRAIL** spécialisé sur les applications médicales de l'imagerie (oncologie, neurologie, cardiologie, etc.), **PRIMES** dont l'objectif est de développer des méthodes d'imagerie appliquées en oncologie et **WIFI** porté sur la physique des ondes et de l'imagerie. Le **CREATIS**, unité de recherche spécialisée en imagerie médicale, le **CENIR**, centre de neuro-imagerie de recherche, et l'**institut d'imagerie neuro-fonctionnelle** sont des centres de recherche importants en imagerie et rattachés à des structures institutionnelles (ICM, CNRS, INSERM). La France accueille également l'**ESRF**, centre de recherche collabo-

ratif européen. **Mircen** et **NeuroSPin** sont enfin des centres de recherche rattachés au CEA qui sont actifs en imagerie pour la santé.

Dans le domaine de la radiopharmacie, les laboratoires publics **Arronax** et **ILL** sont un atout dans la recherche et l'optimisation de procédés de production de radioéléments.

- Organismes de recherche actifs en santé: Bien qu'ils ne soient pas spécialisés dans l'imagerie, d'autres organismes de recherche actifs en santé jouent un rôle notable dans le développement technologique de ce domaine. Il s'agit notamment de l'IRT B-COM, des **Labex** IRON, BRAIN, GRAL, CELyA, CAMI, LMH, COMIN Labs et MS2T. A ces organismes de recherche, s'ajoutent des centres nationaux comme le **CEA** ou l'**Inria**.

- Organismes de formation : L'**Insa Lyon**, en plus d'être une institution tutelle du CREATIS, a ouvert un parcours en Master 2 à l'interface des sciences et de la santé qui comprend des modules dédiés aux technologies de l'imagerie. Le centre de formation **IRCAD** dispose d'une équipe « informatique et imagerie médicale ». L'école **TélécomParisTech** propose également des formations dédiées aux technologies de l'imagerie avec un département de traitement du signal et des images et d'imagerie ultrasonore.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

La principale Entreprise de taille intermédiaire française est la société **Guerbet** qui est pionnière dans le

segment des produits de contraste (fondée en 1926). Sa position sur le marché français, européen et international est intéressante puisqu'elle figure parmi les *leaders*.

PME et TPE

Certaines PME et TPE du tissu industriel français des technologies de l'imagerie pour la santé sont porteuses de l'innovation française dans ce secteur. Leurs compétences couvrent de nombreux segments de l'imagerie : **Supersonic Imagine et Vermon** font figure de leaders mondiaux sur les systèmes d'ultrasons. Supersonic Imagine a ainsi mis au point une technique d'échographie protégée par 30 brevets internationaux. Vermon est un leader dans la conception et la fabrication des transducteurs ultrasonores. Les fondateurs de **Mauna Kea Technologies** se sont inspirés des technologies de l'astrophysique pour mettre au point un système d'endomicroscopie capable de fournir des images en temps réel. **EOS Imaging propose** des systèmes innovants d'imagerie par rayons X basse dose. **Trixell**, *joint-venture* entre les géants de l'imagerie Thalès, Philips et Siemens, est également positionnée sur le secteur des rayons X et fabrique des détecteurs numériques destinés à la radiologie médicale.

Dans le domaine radio pharmaceutique, la France compte 3 entreprises : **Cyclopharma** qui propose des solutions d'imagerie moléculaire pour l'aide au

diagnostic et le suivi thérapeutique en oncologie, neurologie et cardiologie et **CIS bio international** qui propose quant à elle des médicaments radio pharmaceutiques tant en diagnostic pour tomographie par émission de positons (TEP) ou pour la tomographie d'émission monophotonique (TEM) qu'en thérapie. Enfin, l'ETI **Advanced Accelerator Applications (AAA)** conçoit et commercialise des produits diagnostiques thérapeutiques de médecine nucléaire moléculaire dans les domaines de l'oncologie, la neurologie, la cardiologie et les maladies infectieuses et inflammatoires.

Organismes de soutien et d'interface

■ Structures dédiées à l'imagerie : pour soutenir les entreprises françaises un IHU dédié a été créé, le **MIX-Surg**, auquel s'ajoutent **neuf Equipex** qui touchent directement les secteurs de l'imagerie pour la santé (LILI, 7T AMI, ULTRABRAIN, ANINFIMIP, Morphoscope2, ImaginEx BioMed, IMAPPI, Paris-en-Résonance, SENS) ;

■ Structures actives en santé : d'autres structures ne sont pas spécifiquement vouées au développement de l'imagerie pour la santé mais contribuent aux innovations dans ce domaine. C'est le cas de cinq **pôles de compétitivité** (Alsace BioValley, Cancer Bio Santé, Medicen, Lyonbiopôle, Systematic), **de deux IHU** (A-ICM, LIRYC), **d'un IRT** (B-COM), et **de sept Equipex** (ARRONAXPLUS, S3, MUSIC, Flowcytech, REC-HADRON, ROBOTEX, FIGURES).

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

33 Exploitation numérique des données de santé

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, SANTÉ ET BIEN-ÊTRE , Sécurité
Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Intégration ; échange ; smart data ; prise en charge des patients ; technologies de l'information ; protection ; sécurité.



Définition et périmètre

Définition

L'exploitation numérique des données de santé comprend les technologies permettant l'**intégration**, l'**échange** et l'**utilisation de l'ensemble des données médicales** multimodales, pour une application donnée. Ces données peuvent prendre des formes très diverses dans leur contenu comme dans leur format de diffusion. À titre d'exemples, sont ainsi comprises dans les données de santé :

- Les données statistiques à l'échelle d'une population : prévalence et incidence des maladies, maladies émergentes, etc. ;
- Les caractères génétiques, considérés comme des données de santé en France depuis la loi du 6 août 2004 ;
- Les données personnelles relevant du domaine de la santé, particulièrement encadrées par la loi et uniquement diffusables par dérogation pour la recherche médicale et pharmaceutique ;
- Des données sociales sur les individus susceptibles d'influencer leur état médical (âge, sexe, IMC, alimentation, etc.).

Le développement des technologies de communication numérique modifie en profondeur l'utilisation de ces données en médecine.

Les technologies de l'exploitation numérique des données de santé permettent la **création de valeurs sur un ensemble de données traitées et valorisées** pour devenir des *Smart Data* utiles à la **prise de décision et à la recherche médicale**. Elles se distinguent ainsi des données massives ou *Big Data* puisque leur finalité est clairement établie.

Un large périmètre d'applications

L'exploitation numérique des données de santé trouve de nombreuses applications dans des domaines variés de la santé :

- En médecine de **précision** ;
- En médecine **ambulatoire** : l'exploitation numérique des données de santé soutient les soins post-hospitaliers à domicile, par le biais notamment de la télésurveillance médicale qui permet de recueillir et d'interpréter à distance des données de santé ;

■ En médecine **préventive** sur les patients à risque : l'accès aux données de santé contribue à l'amélioration de la prise en charge des patients ainsi qu'à la pharmacovigilance ;

■ **Pour l'amélioration des essais cliniques**, en particulier ceux effectués sur de grands ensembles de population ;

■ En **recherche préclinique**, à travers une meilleure compréhension des mécanismes des maladies *via* l'analyse à grande échelle des données pharmacologiques, pharmacocinétiques et toxicologiques ;

■ En **épidémiologie**, *via* l'analyse de données de santé sur un ensemble de population.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Répondre à des besoins croissants de prise en charge

L'**amélioration de la prise en charge des patients** permise par l'exploitation numérique des données de santé, est un enjeu particulièrement clé. En effet, selon l'OMS, le coût des dépenses de santé liées à une mauvaise prise en charge des patients est estimé entre 6 et 29 milliards de dollars par an dans les pays développés¹.

Le recours aux technologies de l'information pour l'enregistrement et le partage des données médicales des patients est, pour l'organisation mondiale, un élément nécessaire pour tous les professionnels de la prise en charge, en ce qu'il permet une **meilleure maîtrise des dépenses** dans un contexte où les systèmes de santé sont de plus en plus sollicités.

Par ailleurs, l'exploitation numérique des données de santé constitue un facteur important du développement de la médecine de précision.

Atouts de la France

Le positionnement des acteurs français sur cette technologie est d'autant plus important que la France dispose d'une **recherche académique de haut niveau** dans le domaine du développement de logiciels, grâce à l'Inria, établissement public de recherche dédié aux sciences du numérique. L'intégration des données de

¹ – *Smart Healthcare Systems Market Segment Forecasts up to 2022*, Transparency market research, juin 2015

santé est, quant à elle, partiellement assurée par le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (LETI), rattaché au CEA.

Autre atout pour la France, le **bon niveau de la recherche médicale** favorise son positionnement sur le marché de l'exploitation numérique des données de santé.

L'existence **d'un système national des données de santé** (SNDS) est un autre élément qui mérite d'être relevé, alors que le projet de loi de modernisation du système de santé prévoit la centralisation et l'ouverture des données. La France bénéficie en effet d'importantes bases de données publiques nationales, issues historiquement du système de remboursement de l'assurance maladie. Collectées par plusieurs institutions publiques, elles s'avèrent particulièrement complètes et précises et sont déjà utilisées depuis quelques années par les industriels et chercheurs dans le cadre d'études cliniques. Le recours à ces données permet à la fois d'améliorer la prévention, de valider l'efficacité de certaines solutions thérapeutiques, et de contribuer à l'efficacité du système de santé.

Par ailleurs, la **coopération entre les secteurs publics et privés** est très développée en France, s'appuyant sur un tissu industriel essentiellement composé de PME et TPE qui concentrent leurs activités sur l'exploitation des données de santé au sein des hôpitaux ainsi que sur l'échange des données entre les différentes structures de soin. Cet univers industriel travaille ainsi en étroite coopération avec les acteurs publics (ARS, MiPih, etc.) sur des projets de partage des données de santé à l'échelle d'un territoire.

La **volonté des pouvoirs publics** d'accompagner l'émergence des technologies numériques de santé est concrétisée en 2009 par la création de l'ASIP, l'Agence des systèmes d'information partagés de santé. Cette agence a notamment pour mission la maîtrise d'ouvrage des projets de systèmes d'information en santé et la définition de référentiels, standards ou produits contribuant à l'interopérabilité de ces mêmes systèmes. Alors qu'elle était également en charge de la production et du déploiement du dossier médical partagé (DMP), celui-ci devrait très prochainement être confié à la CNAMTS.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché de l'exploitation numérique des données de santé est liée à la maîtrise de production de données ainsi qu'à leur exploitation et à leur analyse.

Technologies de production de données :

- Certains **dispositifs bio embarqués** récupèrent et communiquent des données précises de santé de l'individu dans lequel ils sont implantés (*pacemakers*, pompes à insuline, etc.) ;
- Les **capteurs** peuvent par extension être des composants des dispositifs embarqués et servir à la production de données de santé ;
- De manière indirecte, la **nanoélectronique** aide également à la production de données de santé. En effet, la miniaturisation des circuits intégrés dans les dispositifs et capteurs permet de pouvoir produire un nombre toujours plus important de données.

Technologies d'exploitation et d'analyse des données :

- **L'imagerie pour la santé** : les systèmes d'archivage et de transmission d'images, ou *Picture Archiving and Communication System (PACS)* sont des systèmes d'archive et de partage des données patient particulièrement utiles puisqu'ils constituent un support à la prise de décision médicale.
- **La valorisation et l'intelligence des données massives (Big Data)** : les solutions de *Big Data* sont indispensables à la création de logiciels d'aide à la décision. Les capacités d'analyse de gros volumes de données aident ainsi par exemple au développement de la médecine de précision.

Les marchés

Le marché mondial de l'exploitation des données numériques de santé devrait selon les estimations connaître **une forte croissance à l'horizon 2020**, atteignant **66 milliards de dollars**².

Facteurs explicatifs de cette forte croissance

Ce marché devrait être principalement porté par l'accroissement de la demande pour des données

² – *Healthcare IT: A Global Strategic Business Report*, Global Industry Analysts, 2014

personnelles couplées aux avancées technologiques rapides dans le domaine de la santé numérique. La meilleure acceptation du partage d'informations entre les structures médicales est un autre facteur de croissance du marché, encouragée notamment par des initiatives gouvernementales promouvant les technologies de l'information au sein des structures hospitalières³. En France, ces initiatives prennent par exemple la forme de programmes, tels que « Territoire de soin numérique » qui bénéficie de 80 millions d'euros de financement dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir sur la période 2014-2017 et « Hôpital Numérique » qui définit un plan de développement et de modernisation des systèmes d'information hospitaliers sur la période 2012-2017.

Le marché devrait principalement être porté par le segment des **systèmes d'information technologiques cliniques**, dont les prévisions de croissance sont les plus fortes. À noter que ces systèmes permettent de réduire les erreurs médicales comme par exemple le PACS (système permettant de gérer les images médicales grâce à des fonctions d'archivage).

Répartition mondiale du marché

Aujourd'hui, les États-Unis dominent ce marché, du fait notamment d'initiatives gouvernementales favorables mais aussi de la présence d'infrastructures de technologies de l'information sophistiquées.

Le marché de l'Asie Pacifique est celui qui devrait connaître la plus forte croissance à l'horizon 2020 avec une croissance moyenne annuelle estimée à 11 %⁴. Cette dynamique s'explique à la fois par l'augmentation des dépenses gouvernementales de santé et le développement des investissements dans les structures de soin.

Au rang des acteurs les plus importants du marché de l'exploitation des données de santé se trouvent des producteurs de données spécialisés en santé, tels que General Electric Healthcare, Philips Healthcare, Agfa Healthcare et Samsung Electronics. Certaines sociétés numériques devraient rapidement devenir incontournables sur ce secteur dans les années à venir, à l'instar d'Intel, d'Oracle ou bien de Google.

3 – *Healthcare IT: A Global Strategic Business Report*, Global Industry Analysts, 2014

4 – *Healthcare IT: A Global Strategic Business Report*, Global Industry Analysts, 2014

Les défis technologiques à relever

L'interopérabilité des systèmes

L'évolution rapide et profonde des technologies et des standards constitue un enjeu important de l'exploitation des données de santé puisqu'elle complexifie la compatibilité des systèmes et favorise l'instabilité. L'intégration de données peut en effet prendre plusieurs années, du fait notamment du caractère complexe de l'opération, alors que les technologies dans lesquelles elles sont intégrées peuvent entre-temps être dépassées. Le renfort d'interopérabilité des différents systèmes de données est donc un élément clé pour le développement de l'exploitation des données numériques de santé. Il doit prendre en compte les deux dimensions de l'intégration : l'intégration des systèmes au sein d'une structure et l'intégration permettant l'échange entre différentes structures.

La sûreté des systèmes et le stockage de données massives

La sûreté des systèmes est un autre enjeu important qui doit être mieux pris en compte par l'ensemble des acteurs de l'exploitation numérique des données de santé. Elle concerne tant la sûreté des dispositifs médicaux, qui collectent directement les données, que les logiciels et systèmes, qui exploitent et partagent ces données.

Développer des applications dans les secteurs clés

D'autres défis technologiques de l'exploitation numérique des données de santé résident dans la capacité à développer des applications dans des secteurs clés, notamment la validation des médicaments. Les données de santé pourraient en effet aider les industriels à valider de manière plus rapide leurs nouvelles molécules et à identifier de nouvelles cibles, par le biais notamment du recours à la médecine de précision. La rationalisation de l'approche thérapeutique par la mesure de l'efficacité des médicaments sur les populations étudiées est une autre application importante.

La miniaturisation des technologies de production de données de santé

La capacité à réaliser des circuits intégrés dans les systèmes bio-embarqués et des capteurs, miniaturisés et intégrant le bon volume de données nécessaires au suivi médical, constitue également un défi technologique d'importance.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Structurer un marché fragmenté

Un premier défi commercial de l'exploitation numérique des données de santé concerne la structuration du marché, qui apparaît aujourd'hui fragmenté par une diversité d'acteurs pluridisciplinaires (éditeurs de logiciels, prestataires de services informatiques, fabricants de dispositifs médicaux et de matériels électriques, etc.) ainsi que par le manque de réalisations à l'échelle nationale et la multiplicité d'expérimentations régionales⁵ (exemple des Espaces numériques régionaux de santé mis en place pour intégrer les échanges entre ARS).

Le tissu industriel français est en outre principalement composé de PME et de TPE et ne dispose pas de grandes entreprises capables de concurrencer les leaders mondiaux américains.

Se développer à l'international

Les entreprises françaises sont également très peu actives à l'export et sur la scène internationale. Cela est en partie lié au fait que certaines données dépendent du cadre national (langue, organisation du système de soin, etc.). Ce point pourrait cependant être amélioré si des standards d'intégration à l'échelle internationale étaient élaborés.

Former les professionnels de santé

Enfin, le manque de formation des professionnels de santé aux enjeux de l'exploitation numérique des

données de santé, au partage d'informations et au travail en réseau apparaît être un autre point susceptible de freiner le développement du marché.

Les enjeux réglementaires

La protection des données : entre exigences de confidentialité et sécurité des patients.

La protection des données stockées et échangées est un enjeu particulièrement important dans le domaine de la santé, puisque celles-ci relèvent au niveau réglementaire à la fois de la protection de la vie privée mais aussi du droit d'accès du malade à toutes les informations qui le concernent. Ainsi, si la CNIL encadre les conditions d'accès et d'utilisation des données personnelles en France, l'ASIP est amenée à délivrer sous conditions des agréments aux centres d'hébergement des données de santé.

Les industriels doivent également intégrer l'enjeu de sûreté au sein même de leur systèmes bio-embarqué, le piratage des données contenues pouvant avoir des conséquences directes particulièrement néfastes, à l'instar du détournement à distance du fonctionnement d'un pacemaker par un expert en sécurité informatique.

Le **renforcement des standards de sûreté** des dispositifs bio-embarqués apparaît donc nécessaire. Sur ce point, l'ASIP compte parmi ses missions *la définition, la promotion et l'homologation de référentiels, standards, produits ou services contribuant à l'interopérabilité, la sécurité et l'usage des systèmes d'information de santé.*



Analyse AFOM

ATOUTS

Positionnement favorable sur le développement de logiciels (Inria)

Collaboration forte entre secteurs publics et privés

Création d'une Agence spécialisée (ASIP Santé)

Existence d'un système national de données de santé (SNDS) qui devrait être renforcé

FAIBLESSES

Compatibilité des systèmes complexes

Absence de grande entreprise française capable d'assurer la place de leader à l'international

Manque de formation des professionnels de santé sur ces enjeux

OPPORTUNITÉS

Amélioration de la prise en charge des patients

Réduction des dépenses de santé

Création de bases de données permettant de croiser et de valoriser les informations

MENACES

Risques sur la protection des données (piratage, etc.)

Concurrence des États-Unis, *leader* du marché

Développement de la concurrence sur les marchés de l'Asie-Pacifique

Facteurs clés de succès et recommandations

Afin de pouvoir améliorer le positionnement français sur le marché de l'exploitation numérique des données de santé, il apparaît nécessaire de structurer ce marché aujourd'hui fragmenté. Cette structuration peut consister à :

- Soutenir la coopération entre PME ;
- Renforcer les économies d'échelle pour passer d'expérimentations locales à un marché d'ampleur national ;
- Accompagner des premiers déploiements à grande échelle par des aides financières (R&D, fonds propres, capital-risque).

Les PME françaises doivent en effet réussir à **étendre leur périmètre**, du niveau local au niveau national pour pouvoir atteindre le marché international.

La spécialisation est un autre facteur important du développement des entreprises françaises qui n'apparaissent **pas toujours assez spécialisées sur la chaîne de valeur**. Cela permettrait d'améliorer / renforcer leur positionnement sur ce marché.

L'émergence de standards et de normes, sur la protection des données et la sécurité des dispositifs en particulier, est essentielle pour fluidifier le marché très sensible des données personnelles de santé. Sur ce point, la France bénéficie du fait qu'elle a déjà adopté les standards américains et participé à leur évolution.

Enfin, la formation des professionnels de santé aux enjeux des technologies de l'information est importante pour permettre l'évolution des pratiques de santé.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

L'**Inria** et le **LETI**, rattaché au CEA, sont en France les principaux organismes de recherche sur l'exploitation des données numériques de santé. Alors que le LETI s'intéresse principalement aux technologies d'intégration des données de santé, l'**Inria** développe une activité sur la production logicielle pour l'exploitation de ces données. L'institut travaille également en étroite collaboration avec des entreprises, telle que Microsoft avec qui il a développé le projet *A-Brain*, pensé pour comparer efficacement d'importants volumes de données dans le but d'améliorer le diagnostic de certaines maladies du système nerveux.

Structures institutionnelles

Les structures institutionnelles ont un rôle particulier au sein de l'écosystème français de l'exploitation numérique des données de santé puisqu'elles constituent les principaux clients des entreprises. Ainsi par exemple les **ARS** comme **l'ASIP Santé** font appel à des entreprises pour réaliser des projets pilotes à l'échelle locale, actuellement pour la mise en place du dossier médical personnel numérique.

Les **établissements de santé** sont également d'importants fournisseurs d'offres pour le tissu entrepreneurial français, centres hospitaliers en tête. Ils sont représentés par un **groupement d'intérêt public**, le **MiPih**, qui rassemble plus de 400 établissements de santé qui œuvrent à construire le système d'information hospitalier de demain.

La **CNIL** est enfin un organisme institutionnel important pour l'exploitation numérique des données personnelles de santé puisqu'elle délivre notamment des

autorisations d'accès aux données médico-administratives.

Start-up et PME

Les entreprises de l'exploitation numérique des données de santé sont en France essentiellement des PME dont l'activité principale est le développement de solutions logicielles. La plus importante est **Gege-dim**, qui propose des solutions numériques pour les professionnels de santé, les assureurs, ainsi que les entreprises de santé. **Docapost** a mis au point pour l'Ordre national des médecins la gestion numérique du dossier pharmaceutique (DP). La société **DataMedCare** propose quant à elle des solutions aux acteurs de la santé qui prennent la forme de plateformes informatiques. Par exemple, l'une d'entre elles permet le suivi de patients télé-surveillés pour des pathologies chroniques. L'informatisation du dossier patient est également au cœur des activités de **iCanopée** ou **Umanlife**. La PME **Enovacom** propose de son côté des solutions de sécurité et d'interopérabilité pour l'exploitation des données de santé. La société **Inte-ragen** propose des services de biostatistique et de bioinformatique pour exploiter les données génomiques. Enfin, **Medissimo** développe un système d'information assistant la préparation des doses de médicaments à administrer aux patients.

Organismes d'interface

Les pôles de compétitivité **Cap Digital**, **Medicen** et **Systematic** œuvrent au transfert et à la valorisation des innovations académiques ainsi qu'à la connexion avec les entreprises de l'exploitation numérique des données de santé. Ils soutiennent et accompagnent également ces entreprises par le biais d'appels à projets.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

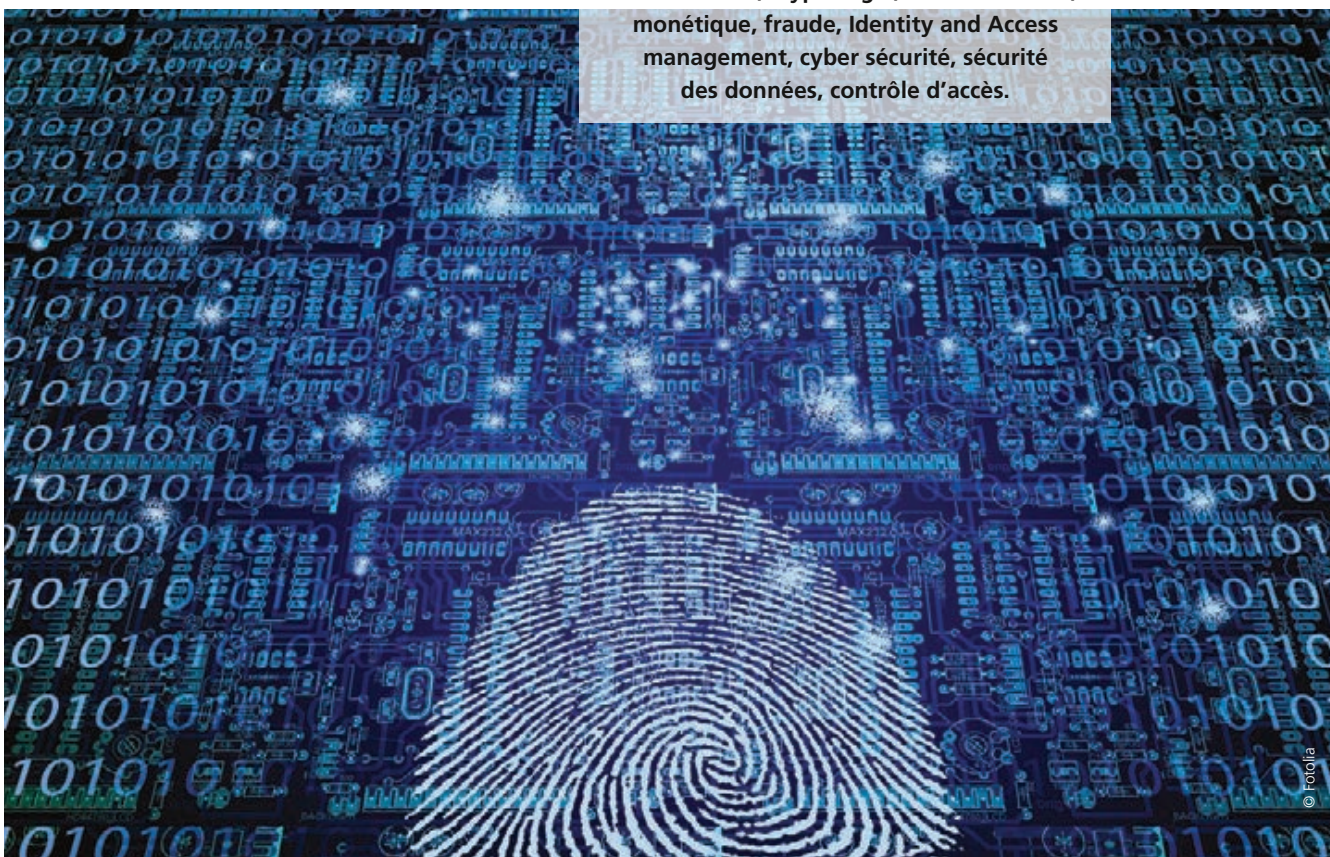
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, SÉCURITÉ
Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Biométrie multimodale, biométrie révocable, multifacteurs, cryptologie, secure element, monétique, fraude, Identity and Access management, cyber sécurité, sécurité des données, contrôle d'accès.



Définition et périmètre

L'authentification est le processus permettant de garantir qu'une entité (personne, machine etc.) est bien celle qu'elle prétend être. Elle permet par exemple de déterminer si une personne qui cherche à accéder à certaines données ou lieux (compte bancaire, profil internet, compte/abonnement divers, téléphone ou ordinateur personnel, etc.) est bien habilitée à le faire. Il ne faut pas confondre cette notion avec l'identification qui correspond à une entité de décliner son identité. L'identification permet donc à une entité d'annoncer son identité et l'authentification permet de la vérifier.

Traditionnellement, trois types de facteurs permettent d'authentifier un individu : ce qu'il sait (mot de passe, code pin, question secrète, etc.), ce qu'il possède (jetons, cartes, etc.) et ce qu'il est (iris, voix, empreinte digitale, etc.). L'authentification est alors qualifiée de forte lorsqu'elle a recours à une combinaison d'au moins deux de ces méthodes. D'un point de vue technologique, nous décrirons 3 types de technologies : les cartes à puces et autres dispositifs externes (*secure elements*), les mécanismes de cryptographie et la biométrie.

■ Les *secure elements* : éléments de sécurité physique

Ces éléments font généralement référence aux puces électroniques que l'on trouve dans nos cartes de paiement, cartes SIM, passeport électronique, puces sécurisées des téléphones et des ordinateurs (TPM) etc.

Dans un nombre grandissant de pays (aux États-Unis depuis 2015), la sécurité des transactions bancaires est assurée par une puce installée sur la carte bancaire. Développée suivant le standard EMV (Eurocard MasterCard Visa), cette puce contient des informations protégées qui permettent d'autoriser (ou non) des transactions. Il en est de même pour le paiement sans contact par carte bancaire.

Comme pour les cartes bancaires, des clés USB cryptographiques contiennent généralement une puce dotée d'un ou plusieurs certificats électroniques associés à une clé privée utilisable à l'aide d'un code PIN. C'est cette clé qui, utilisée dans le cadre d'un processus cryptographique, permettra de réaliser l'authentification des paiements, authentification qui pourra être validée grâce au certificat.

■ Protocoles cryptographiques et méthodes de chiffrement

Il existe deux méthodes de chiffrement : la cryptographie symétrique (ou à clé secrète) et la cryptographie asymétrique (ou à bi-clé privée/publique). La cryptographie symétrique est une méthode basée sur une clé (secrète) permettant de chiffrer et déchiffrer un message. La clé de chiffrement/déchiffrement est alors partagée entre les deux correspondants. Sa compromission engendre immédiatement la capacité de déchiffrement des messages qu'elle a chiffrés pour l'attaquant.

La cryptologie asymétrique se base sur le même principe de clés, sauf que le chiffrement est assuré par une clé publique et le déchiffrement par une clé privée. Cette méthode est certes plus lourde et plus complexe à mettre en place (et généralement plus gourmande en ressources) mais elle possède des caractéristiques réduisant les risques de compromission des échanges chiffrés en cas de perte ou de vol des clés cryptographiques, notamment grâce à l'utilisation de protocoles implantant le concept de « *perfect forward secrecy* ». La cryptographie asymétrique facilite également la gestion et la distribution des clés ce qui permet, par exemple, d'utiliser une même bi-clé pour s'authentifier auprès d'un nombre arbitrairement grand d'entités.

Ce sont les protocoles cryptographiques bâtis à partir de ces primitives qui permettront de construire un schéma d'authentification.

■ One Time Password (OTP)

Lors d'une opération sensible sur une plateforme (achat, banque, etc.), un code est envoyé, généralement par SMS, sur le mobile de la personne liée au profil concerné. Ce code n'est utilisable qu'une seule fois dans un délai très court. Cette pratique s'est fortement démocratisée via son utilisation dans le protocole 3DSecure permettant le renforcement de la sécurité des opérations de paiement en ligne sur internet.

■ Jetons (Token) OTP

Ces (petits) dispositifs génèrent, en général toutes les minutes, un mot de passe qu'il faut entrer en plus de son mot de passe habituel. L'un des dispositifs le plus couramment employé par les entreprises est le *token Secure ID* de la société RSA et ce malgré l'intrusion informatique majeure dont a été victime la société et lors de laquelle la sécurité des jetons d'authentification de ses clients pourrait avoir été compromise.

■ Biométrie

Il existe plusieurs grandes familles de techniques de reconnaissance biométrique : la reconnaissance de l’empreinte digitale, du réseau veineux du doigt, de l’iris, de la voix et de la forme du visage, etc. L’utilisateur se soumet alors à une première phase – l’enrôlement – où il présente à l’autorité en charge de l’enrôlement une ou plusieurs données biométriques qui est modélisée puis stockée comme référence. La seconde phase consiste à s’authentifier, en présentant son empreinte biométrique qui sera comparée à celle référencée.

Les systèmes de reconnaissance biométrique sont largement utilisés dans l’univers de l’identification des citoyens (passeports, douanes, etc.) et de plus en plus au niveau des entreprises et des particuliers pour des problématiques d’authentification. Une caractéristique biométrique est par définition irrévocable : on ne peut par exemple pas changer son empreinte digitale. La mise en place de systèmes de biométrie révoquée à partir de caractéristiques biométriques irrévocables est indéniablement un enjeu crucial (cf. paragraphe 5). La biométrie est aujourd’hui considérée comme le futur de

l’authentification à la condition qu’elle soit utilisée en complément, et non en remplacement, des techniques plus anciennes comme le mot de passe ou les codes PIN. L’authentification forte prend alors tout son sens.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La protection des données sensibles et des infrastructures critiques est un besoin sans cesse croissant. La France tient également une position de leader avec de nombreux acteurs mondialement présents sur la scène de la cybersécurité et de l’authentification forte qu’elle se doit de maintenir.

La technologie clé « authentification forte » pourra également participer à la concrétisation des ambitions de la solution « confiance numérique » de la NFI (Nouvelle France Industrielle). En effet, plusieurs actions de cette solution sont relatives au développement de l’offre de confiance en matière de cybersécurité et de la demande. Les technologies d’authentification constituent « une racine de confiance » pour bien des produits dont le développement sera soutenu dans ce cadre.

Liens avec d’autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent l’authentification forte sont :

2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
19	Analyse comportementale
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel

Les technologies influencées par l’authentification forte sont :

5	Internet des objets
7	Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs
10	Cobotique et humain augmenté
12	Robotique autonome
13	Communications sécurisées

Les marchés

De par le large spectre couvert par les techniques d’authentification forte, une estimation globale du marché reste assez délicate. Le marché de la biométrie, évalué à près de 10 Md\$ en 2014 est estimé à 24,5 Md\$ en 2020¹.

D’une manière plus globale, les entreprises des secteurs français de la cybersécurité et du contrôle d’accès continuent leur progression et atteignent respectivement un

chiffre d’affaires de 2,3 Md€ et 1,3 Md€ en 2013. Des entreprises françaises comme Morpho et sa filiale Dictao, Thales, Gemalto, Oberthur, ou Open Trust fournissent notamment des solutions d’authentification pour les marchés nationaux et internationaux.

■ Un marché tiré par la hausse de la connectivité mondiale et la dématérialisation par la transition numérique

Le marché de l’authentification forte bénéficie de la hausse de la connectivité mondiale ainsi que les applications et pratiques qui y sont liées. Selon l’agence des Nations Unies spécialisées dans les technologies de l’information et de la communication *International*

1 – Traitement Erdyn : « Next Generation Biometrics Technology Markets »

Telecommunications Union, 2,7 milliards de personnes avaient accès à internet dans le monde. 84,4 % de la population en Amérique du Nord et 35,4 % pour l'Europe et l'Asie Occidentale. En France, 82 % de la population en 2013 avaient individuellement accès à internet.

Avec d'autres technologies du Cloud Computing et de du Big Data, cette montée de la connectivité conforte également la montée de la transition numérique et de la dématérialisation, qu'elles soient au niveau des entreprises ou des particuliers (démarches et e-administration, intranet, commerce électronique, etc.). À titre d'illustration, selon la Fédération du E-commerce et de la vente à distance (FEVAD), les transactions financières liées au e-commerce sont toujours en croissance et ont atteint 56,8 Md€ en 2014 en France, en hausse de 11 % par rapport à 2013.

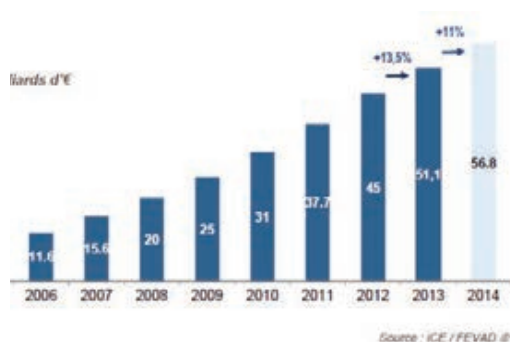


Figure 1 : Chiffre d'affaires généré par le e-commerce en France 2005-2014 (Source : ICE/FEVAD)

Cela coïncide fortement avec la montée en flèche de la cybercriminalité (fraude, piratage, usurpation d'identité) en France comme dans le monde. Le Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale place la sécurité et la défense des systèmes d'information au cœur des priorités stratégiques de la Nation. Rob Wainwright, directeur d'Europol (European Police Office) élève la cybercriminalité au même rang que le terrorisme comme première préoccupation mondiale en termes de sécurité.

Selon SafeNet et Gemalto, près de 1,023 milliard de données ont été volées en 2014 (1 571 incidents) au monde, en croissance de 78 % par rapport à 2013².

² – SAFENET, GEMALTO, 2015: 2014 Year of Mega Breaches & Identity Thefts: findings from the 2014 BREACH LEVEL INDEX.

Les défis technologiques à relever

Les technologies existantes, comme les OTP, éléments de sécurité physique sont aujourd'hui techniquement suffisamment robustes. Toutefois, les solutions biométriques, encore émergentes, montrent encore quelques verrous à lever.

■ La biométrie multimodale : vers plus de fiabilité

Si l'authentification forte a permis de réduire la proportion de transactions frauduleuses dans les transactions bancaires, le nombre d'attaques informatiques ne cesse d'augmenter. La biométrie a récemment montré certaines limites dans la fiabilité avec la reproduction de l'empreinte digitale de la ministre de la défense allemande à partir de photos haute résolution. Il est donc possible de « voler » ces caractéristiques uniques et propres à chaque humain. C'est alors que les techniques de biométrie multimodale prennent tout leur sens. La biométrie multimodale, association de plusieurs données biométriques est actuellement en pleine évolution, à l'image d'entreprises comme BiOLD (Suisse), ComBiom (Suisse) ou encore McAfee qui combinent plusieurs signatures biométriques pour la protection de données (accès smartphone, accès postes de travail, accès cloud, etc.). En juin 2011, la CNIL a attribué à Natural Security l'autorisation d'utiliser conjointement deux techniques de biométrie (l'empreinte digitale et le réseau veineux du doigt de la main).

À ce titre, l'Institut Mines Telecom et PWC ont signé un contrat de partenariat de 4 ans en 2012 autour de la sécurisation des transactions commerciales sur Internet pour réduire les fraudes à la carte bancaire. Les axes de recherche sont la biométrie révoicable, la génération de clés crypto-biométriques et l'authentification biométrique associée à la voix, au système veineux et au visage.

■ Vers la biométrie révoicable

Un des défis de taille pour la biométrie est de pouvoir, à terme, diversifier les empreintes issues d'une seule et même empreinte biométrique. La biométrie révoicable peut exploiter la biométrie dynamique (analyse des mouvements dans une vidéo etc.), ou encore des procédés cryptographiques visant à rendre dépendante l'empreinte biométrique d'une donnée secrète. La biométrie serait alors de plus en plus révoicable. Le Groupe

de recherche en informatique, image, automatique et instrumentation de Caen (GREYC) est connu pour ses travaux poussés sur la conception de systèmes biométriques plus complexes de biométrie révoicable.

La conception et la mise en œuvre pratique de systèmes de biométries révoicables est critique dans la mesure où, en l'état actuel de l'art, la compromission d'une donnée biométrique entraîne la compromission de l'ensemble des systèmes sur laquelle elle est exploitée.

■ Enjeux de la vie privée : anonymat du stockage des données de références.

La biométrie jouera de plus en plus un rôle important dans l'authentification forte. Toutefois un des freins à l'expansion de cette technologie réside dans le stockage des données (profils) biométriques des personnes, qui relève de la vie privée et provoque une réticence à l'utilisation. Des solutions permettant de stocker anonymement les données biométriques sans réduire la fiabilité de l'authentification s'avèreraient essentielles pour le développement de la biométrie. C'est en ce sens que plusieurs acteurs dont la startup française United Biometrics, créée en 2014, ont développé des plateformes d'authentification biométrique multimodale cryptée à stockage anonyme des données de références. L'accès aux données biométrique se fait en temps réel par double authentification : locale (sur le support) et à distance (sur une base de données).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'émergence d'une concurrence dynamique faite de startups, PME ou de grands groupes témoigne

de la tendance au déploiement de solutions biométriques civiles (hors applications douanières), en même temps qu'elle dynamise la concurrence sur ce marché.

Véritable vivier d'excellence technologique, les startups peuvent avoir l'ambition de devenir des partenaires clés de l'innovation technologique des géants donneurs d'ordres des secteurs de la sécurité et de l'internet. À l'image des GAFAs (Google, Apple, Facebook, Amazon), les grands acteurs de l'Internet accentuent l'*open innovation* sur le créneau de l'authentification forte et de la biométrie, considérées comme apportant robustesse et fiabilité à leurs applications (mobile ou web).

Les enjeux réglementaires

En matière de réglementation

■ Mise en œuvre des dispositifs biométriques

La CNIL a publié en octobre 2012 la délibération n°2012-322 portant sur la modification de l'autorisation de mise en œuvre de dispositifs biométriques reposant sur la reconnaissance du contour de la main initialement pour le contrôle d'accès, la gestion des horaires et la restauration sur les lieux de travail. La gestion des horaires n'est plus autorisée par la CNIL, mais le contrôle d'accès le reste.

Une proposition de loi, soumise au printemps 2014, vise à encadrer plus précisément au niveau législatif les situations pour lesquelles le recours à la biométrie est autorisé.

Dispositif utilisé	Finalité du traitement			
	Contrôle d'accès salariés/visiteurs sur le lieu de travail	Accès aux ordinateurs portables professionnels	Contrôle d'accès à la cantine scolaire	Autre finalité
Contour de la main	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-007)	Demande d'autorisation	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-009)	Demande d'autorisation

Dispositif utilisé	Finalité du traitement			
	Contrôle d'accès salariés/visiteurs sur le lieu de travail	Accès aux ordinateurs portables professionnels	Contrôle d'accès à la cantine scolaire	Autre finalité
Empreinte digitale	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-008)	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-027)	Demande d'autorisation	
Réseau veineux de la main	Déclaration de conformité (si traitement conforme à l'AU-019)	Demande d'autorisation	Demande d'autorisation	Demande d'autorisation

En matière de certification

La confiance dans les produits ou schémas d'authentification est un enjeu critique. La confiance ne peut se décréter, elle doit faire l'objet d'une évaluation indépendante par des laboratoires compétents et conforte la nécessité d'un haut niveau d'exigence en matière de certification pour les applications sensibles.

En France, cette évaluation est réalisée par les centres d'évaluations de la sécurité des technologies de l'information (CESTI) dans le cadre du schéma international des critères communs ou de schémas nationaux tels

que la certification de sécurité de premier niveau. Cette évaluation donne lieu à une certification par l'Autorité nationale de sécurité des systèmes d'information (l'ANSSI).

La France croit à la nécessité du maintien d'un haut niveau d'exigence en matière de certification pour les applications sensibles.

Les entreprises françaises doivent pouvoir disposer de solutions vertueuses en matière de protection des données personnelles et de sécurité adaptés aux enjeux.

Analyse AFOM

ATOUTS

Leadership technique dans le domaine de la biométrie, secure element (carte à puce) et transactions monétiques

FAIBLESSES

Tissus d'entreprises français important mais individuellement de taille trop modeste face aux géants américains de l'Internet et de l'électronique

OPPORTUNITÉS

Besoin croissant en protection des données personnelles

Lutte contre la fraude à l'identité (bancaire, droit aux aides sociales)

MENACES

Intégration verticale des technologies par les fournisseurs de *smartphones*

Leadership américain dans le domaine des fournisseurs de solution de sécurité numérique

Facteurs clés de succès et recommandations

D'une manière générale, la réussite des technologies de l'authentification forte de demain réside dans la démocratisation de la biométrie, encore émergente, face aux autres technologies déjà matures et ancrées dans l'écosystème.

À l'image du domaine du paiement, qui est déjà fortement normé et standardisé (standard EMV), il serait judicieux de mettre en place un environnement standardisé pour le développement des futures technologies de la biométrie pour d'autres applications émergentes : authentification d'un fichier source pour la fabrication additive, authentification de produits, etc.

En France, l'exemple de Natural Security Alliance et du GIE Cartes Bancaires est important à citer. Natural Security était une startup créée en 2008 et qui développait des systèmes d'authentification biométrique digitale et veineux. Natural Security a mené une enquête pilote auprès d'utilisateurs et de commerçants. Cependant, la startup a redirigé son activité sous forme d'alliance. Natural Security Alliance travaille aujourd'hui avec le GIE Cartes Bancaires afin d'inscrire la biométrie dans les standards de paiement par carte bancaire.

Acteurs clés :

Entreprises	Atos, CapGemini, CybelAngel, Gemalto, Ingenico, Insidesecond, Morpho, Oberthur, OpenTrust, United Biometrics...
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX...
Instituts Carnot	TSN...
Autres centres de recherches	ENSICAEN, Laboratoire GREYC – ENSICAEN, Laboratoire SAMOVAR, Télécom Sud-Paris/Institut Mines Télécom...
Pôles de compétitivité	Images et Réseaux, SCS, Systematic, TES...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	CNIL, GIE carte bancaire, Natural Security Alliance...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT , Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Gestion intelligente de l'eau, smart water network, smart water resources, smart metering, big data, interopérabilité, sécurité des données, ville durable.



Définition et périmètre

Définition

La gestion intelligente consiste à **collecter** des données au moyen notamment d'équipements *hardware* (capteurs) et à les transmettre, les sélectionner et les **analyser** au moyen d'équipements *software* (SIG¹, outils d'aide à la décision, etc.).

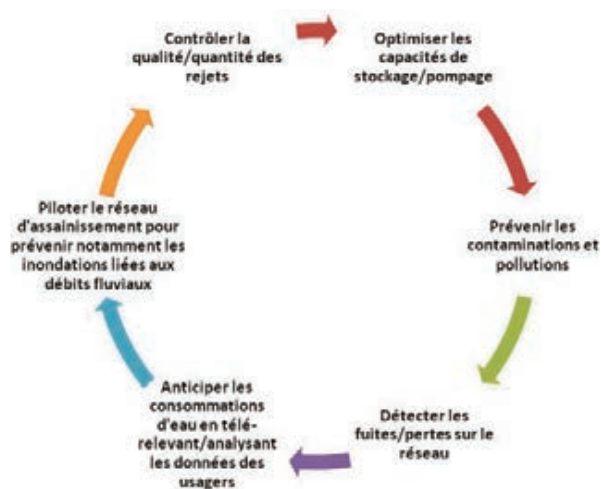
Alors que la consommation d'eau mondiale devrait drastiquement augmenter dans les prochaines années sous l'effet de la croissance démographique et des efforts réalisés sur l'accès à l'eau², la gestion intelligente de l'eau constitue de fait un levier d'innovation pour **limiter le gaspillage de ressources hydriques**. Elle cherche à répondre aux nouveaux enjeux sociétaux d'ampleur planétaire qui portent sur :

- Les pressions sur les ressources en eau ;
- Le suivi de la qualité des eaux avec notamment l'apparition de nouvelles substances décelables (micropolluants, métaux, etc.) ;
- La maîtrise des coûts d'investissement et de fonctionnement liés à la gestion des réseaux ;
- La gestion des événements extrêmes, qui nécessitent une réponse rapide.

Applications

Elles couvrent tout le cycle de l'eau (qualité et disponibilité de la ressource : *smart water resources* / gestion patrimoniale des réseaux : *smart water network* / comptage : *smart water metering*). Pour les réseaux d'eau, la gestion intelligente de l'eau peut couvrir les applications suivantes :

La gestion intelligente de l'eau trouve également sa pertinence en milieu industriel et agricole. Pour l'industrie, elle peut permettre d'assurer une maintenance prédictive des installations d'eau pour anticiper et éviter les arrêts de l'activité (ex : refroidissement des centrales nucléaires, usage de l'eau dans les procédés



industriels de l'industrie agro-alimentaire, etc.). Appliquée à l'agriculture, elle sert à optimiser l'irrigation et prévenir les intempéries (ex : risque de gel).

Technologies

La gestion intelligente de l'eau mobilise des technologies aux 3 grandes étapes de la chaîne de gestion des données :

Volet Hardware	Volet Software	
Collecte/transport des données	⇒ Traitement des données	⇒ Visualisation des données
Capteurs Drones Radio-identification Communication (WiFi, en champ proche, 5G, etc.) Cloud	Intelligence artificielle Technologies de <i>data mining</i>	Interfaces homme-machine Système d'information géographique Réalité augmentée Simulation 3D Terminaux mobiles embarqués Informatique portable Applications mobiles

1 – Système d'information géographique.

2 – Selon le dernier *Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau* des Nations Unies (WWDR4 – 2012), la consommation d'eau dans l'agriculture, premier poste de consommation, devrait augmenter de 19 % d'ici 2050.

Au vu de l'état actuel de développement des technologies du *smart water*, les enjeux sur le plan technologique portent aussi bien sur l'**optimisation technologique** que sur le **développement de nouveaux services innovants**. Dans le domaine de l'agriculture par exemple, le déploiement de capteurs sans fil permet d'ajuster les débits d'eau à la teneur en humidité des sols. L'utilisation de drones aquatiques commence également à se développer pour mesurer la quantité et la qualité des ressources disponibles³.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le bénéfice de la gestion intelligente de l'eau n'est pas seulement écologique : il est sociétal et aussi économique. Dans un contexte de rationalisation des dépenses, ces technologies de gestion intelligente contribuent à la réalisation d'**économies substantielles** pour les secteurs industriels, les collectivités, les exploitants et les particuliers. En 2012, ce potentiel d'économies était estimé au niveau mondial entre 7,1 et 12,5 milliards de dollars par an par le fournisseur de technologies intelligentes Sensus⁴. Les principaux postes de réduction sont la diminution des fuites et l'optimisation des investissements d'infrastructures.

Par ailleurs, ces technologies participent à la préservation d'une ressource de qualité qui contribue à l'attractivité d'un territoire et à ses capacités de développement. Elles répondent aussi à des enjeux de sécurité publique et de santé en facilitant la gestion des flux : les pluies torrentielles peuvent être déviées dans des bassins d'orage pour éviter la saturation des stations d'épuration, les eaux de ruissellement étant alors directement rejetées dans les cours d'eau, parfois non loin d'un captage d'eau potable.

Pour capter un marché en forte progression, la France dispose d'**atouts solides**. Ses principaux opérateurs de services à l'environnement et de TIC⁵ sont bien implantés à l'international. Par ailleurs, ils se sont déjà engagés dans des collaborations avec des PME et des acteurs académiques pour développer des offres intégrées de gestion intelligente de l'eau.

3 – Le Figaro, 20/02/2015 : « La high-tech envahit les champs ».

4 – Sensus, 2012 : *Water 20/20, bringing Smart Water Networks into focus*.

5 – Technologies de l'information et de la communication.

Liens avec d'autres technologies clés

Les six technologies clés suivantes ont une influence forte sur la gestion intelligente de l'eau :

- **Capteurs** : leur perfectionnement peut permettre de renforcer la qualité/précision des données collectées, en permettant par ailleurs de remonter des données de zones difficiles d'accès.
- **Internet des objets** : la gestion intelligente de l'eau repose sur des équipements communicants.
- **Modélisation, simulation et ingénierie numérique** : le traitement prédictif des données peut être affiné par l'amélioration des technologies de visualisation numérique.

■ **Intelligence des données massives** : la gestion intelligente de l'eau revient à collecter et traiter des grands volumes de données. Le Big Data s'avère donc clé, notamment pour la mise en place de systèmes de gestion intelligente à l'échelle de grandes agglomérations.

■ **Intelligence artificielle** : la collecte et le traitement des données se perfectionne avec l'amélioration des technologies d'intelligence artificielle.

Les deux technologies clés suivantes ont une influence faible sur la gestion intelligente de l'eau :

■ **Infrastructures de 5^{ème} génération** : la 5G devrait fluidifier les transferts de données des capteurs aux centrales de traitement, tant sur le plan du volume que de la rapidité des transferts ;

■ **Diagnostic rapide (eau, air et sol)** : ces technologies peuvent permettre d'améliorer les données sur la qualité de l'eau, et ainsi perfectionner les dispositifs de gestion intelligente de l'eau.

Les marchés

Le marché mondial de la gestion intelligente de l'eau connaît un **développement rapide**. Selon l'institut d'études de marché américain Researchandmarkets, il était estimé à 6,06 milliards d'euros en 2015, contre 4,32 milliards d'euros en 2012, soit une hausse de 40 % en trois ans⁶.

6 – ResearchandMarket, 2015 : *Smart Water Management Market by Solutions (Network Monitoring, Pressure Management, Analytics, Meter Data Management), by Services (Valve and Information Management, Pipeline Assessment), by Smart Meter Types, by Region - Global Forecast to 2020*.



À l'horizon 2020, il devrait continuer de **progresser**, même si les estimations des experts divergent. Le groupe IBM table sur un chiffre d'affaires de 18 milliards d'euros en 2020. La dynamique du marché serait tirée notamment par le **segment du software**, dont la croissance annuelle est estimée à 25 % par an⁷. Les estimations de Researchandmarkets et du cabinet américain Lux Research sont plus mesurées mais toujours dans la même dynamique positive. Elles s'élèvent à respectivement 16,47 milliards d'euros et 14,7 milliards d'euros en 2020.

Concernant le *smart water metering*, la zone nord-américaine représentait à elle seule **70 % des compteurs d'eau intelligents** en 2010⁸. L'Europe représentait quant à elle environ 25 % des compteurs, l'Asie près de 5 %. Dans cette dernière zone, la demande se concentre dans certains pays émergents comme l'Inde, la Chine ou les Philippines.

Concernant le *smart water network*, la France, pays dans lequel 50 % des canalisations d'eau sont antérieures à 1972, constitue un **marché porteur**. Près de 20 % de l'eau potable seraient encore gaspillés lors de sa distribution⁹, ce qui s'avère en-dessous de l'objectif de rendement de 85 % affiché dans la loi Grenelle II (12 juillet 2010). Tiré par cet objectif réglementaire, le marché l'est également par la prise en compte

7 – Frost & Sullivan, novembre 2012 : Global Smart Water Market 'Unearthing the REAL Value of Water and the Industry.

8 – IMS, 2011 : *The World Market for Water Meters*.

9 – France Libertés, 60 millions de consommateurs, 2014 : *Eau : le grand gaspillage*.

croissante de critères de développement durable dans l'aménagement du territoire. À titre d'exemple, l'aménagement d'éco-quartiers ou la construction de bâtiments alignés sur les standards de Haute-Qualité Environnementale intègrent souvent l'installation de dispositifs de gestion intelligente de l'eau.

Les défis technologiques à relever

Les défis technologiques à relever concernent principalement la collecte et le traitement de données, la compatibilité entre les différentes technologies et la sécurisation des données.

Améliorer la collecte et le traitement des données

Au niveau de la collecte des données, le développement de **capteurs sans fil, autonome, multi-paramètres¹⁰ et à coût maîtrisé** constitue un défi de premier plan. Pour la gestion des réseaux d'eau, un tel capteur pourrait en effet faciliter la couverture de superficies importantes ou de zones isolées, aujourd'hui complexe à mettre en œuvre.

Pour les industries, l'enjeu porte plutôt sur le **traitement de données collectées sur plusieurs sites industriels**, parfois dans différents pays.

Par ailleurs, quel que soit l'usage de l'eau, domestique ou industriel, la **précision des données collectées** reste un champ de recherche prioritaire. Si la mesure des paramètres liés à la quantification de l'eau est globalement maîtrisée, celle des paramètres liés à sa qualification est encore en voie de perfectionnement.

Des solutions qui ne sont pas toujours compatibles

L'**interopérabilité** entre les différentes technologies *hardware* et *software* représente un second défi. En milieu industriel notamment, les systèmes d'informatique décisionnelle (DSS) utilisés pour la gestion intelligente de l'eau ne sont pas toujours compatibles avec les équipements de mesure/contrôle utilisés directement sur le terrain, comme les terminaux distants (RTU) ou les automates programmables industriels (PLC). Ces situations peuvent conduire à des **systèmes « captifs »**¹¹ : l'absence d'interopérabilité entre les technologies de différentes marques oblige le gestionnaire à utiliser les équipements d'un seul fabricant.

10 – Le capteur peut remonter des données multiples (quantité, qualité, débit, etc.) et sous différents formats.

11 – Analyse du site www.smartgrids-cre.fr.

La sécurisation des données : un enjeu croissant

Enfin, la **sécurisation des données** reste un frein majeur¹². La gestion intelligente de l'eau implique la collecte et le stockage de données massives qui renforcent la vulnérabilité des réseaux aux failles de sécurité (cyberattaques, fuites de données des usagers, etc.). Pour les réseaux d'eau étendus, en particulier, la multiplication de points de collecte rend plus complexe leur contrôle systématique. Sur le plan technologique, garantir la sécurisation et la confidentialité des données appelle le développement de technologies d'algorithme pour la détection de risques potentiels et de systèmes d'identification plus performants. Tout l'enjeu revient ensuite à diffuser ces dispositifs de contrôle à des coûts abordables pour les collectivités et les industries.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Des collaborations technologiques nécessaires

Le développement d'offres sur le marché de la gestion intelligente passe par la **formation de partenariats industriels solides** dans la mesure où il implique la mobilisation à la fois de capitaux conséquents et de technologies/expertises diversifiées (connaissance du milieu et de ses spécificités, conception de capteurs, gestion de réseaux, TIC¹³, SI¹⁴, modélisation, etc.). À titre d'exemple, les deux principaux opérateurs de services à l'environnement français, Veolia et Suez Environnement, ont récemment formé des alliances avec Orange et IBM pour le premier et SFR pour le second. Ces opérateurs peuvent apporter une compétence « métier » en gestion de réseaux d'eau. Pour les start-up et PME souhaitant se positionner sur le marché de la gestion intelligente de l'eau, un enjeu fort consiste donc à s'associer à des partenaires en capacité de porter une offre intégrée¹⁵.

Nouer des liens dans les pays émergents

À l'international, le marché nord-américain apparaît verrouillé par les leaders américains du secteur : General Electric, IBM, Itron, etc. Toutefois, les **pays**

émergents pourraient représenter des débouchés prometteurs. Connaissant une urbanisation forte, ces pays sont confrontés à des problématiques importantes de rareté, de fuites et de vols d'eau. Par ailleurs, ils sont généralement en phase de primo-équipement et susceptibles de faire rapidement un saut technologique. Enfin, certains d'entre eux ont déjà engagé des stratégies de villes intelligentes. À titre d'exemple, l'Inde a déjà annoncé la mise en œuvre de 100 projets de *smart city* d'ici 2022¹⁶. La pénétration de ces marchés passerait notamment par la construction de **partenariats** avec des acteurs locaux, pouvoirs publics comme équipementiers¹⁷.

Adapter l'offre aux besoins

Enfin, la plus-value d'offres innovantes et permettant de se différencier sur un marché concurrentiel reposera sur leur adéquation avec les attentes des usagers. Les technologies proposées doivent donc être définies avant tout à partir d'une approche qui parte du point de vue du « *end-user* » : particuliers, gestionnaires de réseaux, collectivités publiques, industriels, etc.

Les enjeux réglementaires

Des cadres internationaux et nationaux globalement favorables

La gestion de l'eau constitue une préoccupation majeure régulièrement au programme des **grands rendez-vous internationaux**. L'objectif mondial pour le développement n°7, adopté en 2000 par les États-Membres de l'ONU, visait à réduire de moitié d'ici 2015 le taux de la population qui n'a pas accès à l'eau potable et à l'assainissement. Atteint en 2010, cet objectif a été complété par la reconnaissance comme droit de l'homme de l'accès à une source d'eau potable, lors du conseil mondial de l'eau organisé à Istanbul en 2009.

Par ailleurs, des stratégies et réglementations sont mises en œuvre aux **échelles nationales et territoriales** pour mieux gérer les ressources hydriques, avec parfois le soutien de la coopération internationale pour les pays en développement. À titre d'exemple, les collectivités françaises interviennent aux côtés des autorités locales du Sud pour renforcer leurs politiques de gestion de l'eau dans le cadre de la coopération

12 – La Tribune, 14/01/2015 : « La cyber-sécurité, clé de l'avenir des *smart cities* ».

13 – Technologies de l'information et de la communication.

14 – Services en ingénierie informatique.

15 – Au sens d'une offre permettant de couvrir tout le cycle de l'eau.

16 – INDIA TV, 11/06/2015.

17 – McKinsey, 2013 : *Partnering to build smart cities*.

décentralisée. Ces dynamiques internationales comme locales créent des conditions propices au développement des technologies de gestion intelligente de l'eau.

Des technologies en phase avec les exigences de la réglementation française

Le cadre réglementaire français s'avère également **favorable**. D'une part, ces technologies peuvent répondre à l'obligation imposée aux exploitants par la loi Grenelle 2¹⁸ de produire un descriptif détaillé de leurs réseaux de distribution d'eau potable, en permettant par exemple de mesurer le vieillissement des canalisations¹⁹. D'autre part, la loi Grenelle 2 définit également une obligation pour les collectivités de fixer un plan d'action pour la réduction des pertes d'eau sur leur réseau de distribution, lorsque ces dernières dépassent un seuil de 15 %. La mise en place d'une gestion intelligente constitue une piste de solution pour répondre à ce problème.

Le défi de la protection juridique des données personnelles

Des enjeux réglementaires subsistent toutefois sur le plan de la **protection des données des usagers**.

En ce sens, les enjeux de la gestion intelligente de l'eau recourent plus largement ceux de la gestion du *Big Data*. Les particuliers sont souvent peu enclins à transmettre leurs données personnelles de consommation sans garantie de sécurisation. Or, si un cadre juridique en matière de protection existe bien²⁰, un flou subsiste sur le stade précis du protocole de collecte/traitement où la réglementation commence à s'appliquer²¹. Prises séparément, les données collectées sur un usager ne permettent pas de l'identifier. Toutefois, l'étape suivante de traitement/croisement entraîne sa ré-identification. En conséquence, le gestionnaire du réseau ne sait pas s'il doit mettre en œuvre les obligations qui lui incombent²² en amont ou pendant le traitement, alors même que sa responsabilité est engagée au pénal. Si le gestionnaire fait le choix de l'amont, il est tenu d'expliquer à l'usager l'utilisation qui sera faite des données personnelles, mais cette utilisation n'est pas toujours clairement connue à cette étape. Cette situation de flou juridique ne permet de rassurer ni l'usager sur l'utilisation qui sera faite de ses données, ni le gestionnaire sur les risques encourus en les utilisant.

18 – Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010.

19 – Actu-environnement.com, 02/06/2014 : « Les réseaux intelligents, un levier pour la connaissance patrimoniale ? ».

20 – La loi française encadre l'usage de données à caractère personnel ou confidentiel. De ce fait, le traitement d'information survenant dans le cadre de technologies de gestion intelligente doit faire l'objet d'une qualification juridique préalable pour appliquer les garanties légales.

21 – L'Usine Nouvelle, 09/01/2014 : « Big data : le cadre juridique existe ».

22 – Ces obligations impliquent par exemple d'informer l'usager, d'obtenir son consentement, de lui indiquer l'usage qui va être fait des données, etc.

Analyse AFOM

ATOUS

Une implantation internationale de grands groupes français facilitant la pénétration de nouveaux marchés

La constitution d'alliances pour le développement d'offres intégrées

Des objectifs réglementaires en termes de gestion de l'eau favorables aux technologies de gestion intelligente

FAIBLESSES

Un positionnement très faible des acteurs français sur des marchés nord-américains verrouillés

Des usagers français souvent réticents à communiquer leurs données personnelles

OPPORTUNITÉS

Des besoins forts pour une meilleure maîtrise des consommations d'eau, aussi bien dans les pays en développement que dans les pays développés

Un marché mondial en forte croissance

La prise en compte de critères environnementaux dans les opérations d'aménagement du territoire

MENACES

Une concurrence forte, en particulier des SII américains, allemands ou encore israéliens

Une problématique de sécurisation des données

Facteurs clés de succès et recommandations

Pour les pouvoirs publics :

■ Engager une réflexion sur les verrous réglementaires du *Big Data*. La protection du « patrimoine informationnel » par le biais des contrats opérateurs/usagers apparaît notamment comme une piste de solution jugée pertinente par certains observateurs²³.

Pour les entreprises :

■ Nouer des partenariats avec des entreprises locales dans les pays émergents pour développer des offres adaptées aux capacités d'investissement de ces pays ;

■ Valoriser des références solides (études de cas, projets pilotes, etc.) fondées sur des analyses coûts/avantages chiffrées pour convaincre les investisseurs publics ou privés.

Pour les académiques :

■ Poursuivre les travaux dans le champ de la précision des données ;

■ Consolider les recherches autour du perfectionnement des capteurs (autonomie énergétique, robustesse, granulométrie, coût, etc.).

Acteurs clés

Le secteur de la gestion intelligente de l'eau regroupe en France :

- Des grands groupes :
 - Les principaux opérateurs de services à l'environnement, proposant une offre structurée ou en cours de structuration en partenariat souvent avec des SII : Suez Environnement et SFR, Veolia et Orange, Saur, etc.
 - Les équipementiers : Schneider Electric²⁴, Saint-Gobain Pont-à-Mousson, etc.
- Des PME proposant généralement des équipements spécialisés (capteurs, logiciels de modélisation, etc.) :

Lacroix Sofrel, Hydreca, Perax, Ponsel, Sensus France, Sappel, Grundfos France, Esecos systems, Hydrelis, DSI, Fluidion, EFS, Advitam, etc.

- Des start-up : Smarteo Water, Biomae, etc.

Dans le domaine du *hardware* comme du *software*, la R&D est principalement tirée par les activités de recherche de ces entreprises. La gestion intelligente de l'eau s'inscrit également parmi les axes stratégiques des pôles de compétitivité Advancity, Axelera, DREAM Eaux & milieux, Hydreos et le pôle EAU. L'IRSTEA et l'INRIA travaillent également sur ce sujet, et plus largement sur les réseaux intelligents.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

23 – CVML, juin 2013 : « Big data : les enjeux juridiques d'une (r)évolution technologique ».

24 – Schneider Electric est l'un des membres fondateurs du Smart Water Networks (SWAN). Lancée en mai 2011, cette alliance mondiale regroupe des entreprises de premier plan dans la gestion intelligente de l'eau (TaKadu, Sensus, Derceto, i2O Water, etc.).

36 Technologies de diagnostic rapide (eau, air, sol)

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT , Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Diagnostic rapide, métrologie, capteurs communicants, data mining, pollution, échantillonnage sur un tube adsorbant, kits colorimétriques, spectroscopie UV, fluorescence X, bioindicateurs, biomarqueurs



Définition et périmètre

Définition et applications

Les technologies de diagnostic rapide appliquées à l'environnement permettent de collecter et traiter des données issues de différentes « matrices » (eau, air, sol) dans un laps de temps court, voire en temps réel pour les diagnostics en continu. Outils de surveillance des milieux, elles concernent les applications suivantes :

- Diagnostic de la qualité de ressources naturelles ;
- Évaluation des pollutions ;
- Anticipation des besoins en traitement ;
- Prévention d'un risque naturel (éboulements, inondations, etc.) ;
- Évaluation des expositions individuelles ou collectives

Elles visent *in fine* à faciliter l'aide à la décision pour les pouvoirs publics (dépollution d'un sol, mise en place d'une politique de qualité de l'air, etc.) et les entreprises (optimisation de procédés industriels, contrôle de la qualité des effluents, etc.), voire les citoyens ou consommateurs. Par rapport à des analyses différées en laboratoire, elles offrent une rapidité d'intervention susceptible de limiter l'impact d'une pollution ou d'un aléa naturel.

Périmètre technologique

Le diagnostic rapide pour l'eau, l'air et le sol repose sur des technologies de métrologie et de traitement des données (capteurs communicants, transmetteurs, technologies de *data mining*, etc.), la plupart du temps déployées sur site. Le choix d'une technologie ou d'une combinaison de technologies varie selon plusieurs paramètres :

- L'usage et la précision attendus du diagnostic (contrôle de la qualité, dépistage de polluants, etc.) ;
- Les types de polluants ciblés en cas de surveillance d'un milieu ;
- Le type d'utilisateur (industriel, collectivité, particulier, etc.) ;
- Le milieu concerné (complexité, fragilité, etc.) ;
- Le délai souhaité de traitement des données (en continu ou ponctuel / instantané ou avec un délai de quelques minutes, etc.) ;

- La mise en œuvre sur un site fixe ou un « porteur » mobile ;
- Le coût.

L'adaptabilité des technologies de diagnostic rapide à ces différents paramètres, en conservant des coûts maîtrisés, représente un vrai enjeu. C'est le cas également de l'adaptation de technologies issues d'autres secteurs, des biotechnologies par exemple, aux besoins de mesurage environnemental.

Technologies de l'air

Développées depuis les années 1990, notamment pour la mise en œuvre de la loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, les technologies de surveillance de la qualité de l'air apparaissent comme les plus matures, même si le diagnostic rapide est plus récent. Elles se décomposent en 2 familles : actives et passives. Pour les premières, la méthode de prélèvement de référence fixée par la Directive européenne 2008/50/CE est l'échantillonnage sur un tube adsorbant, mobilisant des équipements lourds (pompes, débitmètres, etc.). Les méthodes passives, plus récentes et moins sérieuses sur le plan de la normalisation, mettent en œuvre des équipements plus légers (capteurs de faible capacité, tubes, etc.). De ce fait, elles sont généralement plus adaptées pour la mesure de l'air intérieur. Les progrès récents en termes de traçage des sources de pollution ainsi que ceux en termes de miniaturisation ouvrent des perspectives pour de nouveaux services.

Technologies de l'eau

Le diagnostic rapide de l'eau comprend une gamme de technologies déjà relativement perfectionnées permettant de mesurer la potabilité de ressources, surveiller des filtres, enregistrer la pression dans une canalisation, contrôler des processus de dessalement ou encore surveiller des systèmes d'assainissement. Elles incluent des technologies de mesure ponctuelle (kits colorimétriques, laboratoires de terrain, etc.) et de mesure en continu (analyseurs de toxicité à l'aide de bactéries nitrifiantes, instruments de spectroscopie UV, etc.).

Technologies des sols

Pour les sols, des technologies de diagnostic sur site ont été lancées ces dernières années sur le marché pour des usages précis. La plupart d'entre elles restent encore peu matures. Les diagraphies et sondages MIP

(Membrane Interface Probe) ou les mesures géophysiques permettent un screening complet d'une zone, sans toutefois identifier directement les polluants. Les appareils portatifs à photo-ionisation ou les kits colorimétriques renseignent sur la famille de polluants et l'étendue de la pollution. Les appareils portables de fluorescence X garantissent souvent une identification plus précise des polluants. Le CEA Leti a par ailleurs développé une approche plus exploratoire par capteurs électrochimiques pour caractériser en continu la composition d'un sol. L'Université de Pau et des pays de l'Adour a développé une compétence forte dans le domaine de la mise au point de capteurs électrochimiques pour l'analyse en continu de métaux lourds.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Le développement du diagnostic rapide pour l'air, l'eau et les sols constitue une problématique environnementale forte. En détectant et caractérisant les pollutions d'un milieu, il va permettre de donner les clés à la puissance publique, aux entreprises et aux particuliers pour mieux le préserver, voire d'en faire un atout concurrentiel pour un territoire. L'identification des polluants est également un sujet-clé de santé publique.

La France dispose d'un tissu de PME à la pointe dans le domaine de la métrologie¹, même si l'offre française reste peu structurée. Des structures d'excellence offrent par ailleurs de bonnes capacités de recherche fondamentale et appliquée.

Liens avec d'autres technologies clés

Quatre technologies clés ont une influence sur les technologies de diagnostic rapide pour l'environnement :

- **Les capteurs** (influence forte) : étant donné que le diagnostic rapide repose en grande partie sur ce type d'équipements, leur perfectionnement permet d'améliorer la précision de l'analyse ;
- **La métaomique** (influence forte) : les méthodes d'analyse ciblant différentes molécules (ADN, ARN, protéines, etc.) pour étudier des communautés

microbiennes dans les milieux peut permettre de mieux connaître et comprendre les pollutions, et améliorer leur traitement ;

- **La microfluidique** (influence forte) : l'étude et la caractérisation des fluides prélevés permettent un diagnostic rapide des pollutions environnementales et de leur toxicité ainsi que des phénomènes mis en jeu ;

- **La robotique autonome** (influence faible) : le diagnostic rapide mobilise des équipements d'analyse autonome. La robotique autonome correspond ainsi à une piste de développement pour cette technologie.

Par ailleurs, le diagnostic rapide a une influence sur le développement des deux technologies suivantes :

- **La gestion intelligente de l'eau** (influence faible) : le diagnostic rapide peut être considéré comme l'un des maillons de la *smart water* ;

- **Le traitement des sols pollués** (influence forte) : un diagnostic rapide et précis d'un sol permet de renforcer la qualité du traitement et la rapidité de sa mise en œuvre.

Les marchés

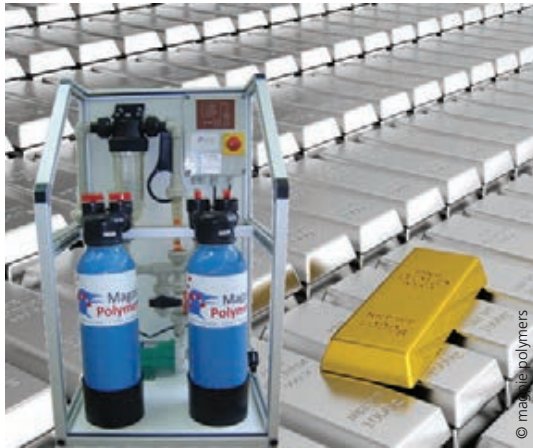
Au niveau mondial, le marché de l'analyse environnementale a modérément progressé ces dernières années. Il était estimé à 8,1 milliards d'euros en 2008 et à 9,1 milliards d'euros en 2014, soit une croissance de 2 % par an². En 2015, les États-Unis représentaient le premier marché mondial, avec un chiffre d'affaires estimé à près de 2 milliards d'euros³. Le marché se caractérise par une multiplicité de PME spécialisées, mais dont les chiffres d'affaires cumulés représentent une proportion mineure de l'activité totale générée. L'essentiel de cette activité est ainsi réalisé par plusieurs grands groupes non spécialisés européens (60 % des fournisseurs en 2011) et américains. Pour l'eau, les leaders sont principalement américains (Emerson Process, Teldyne, Hach Lange, etc.), japonais (Horiba, Yokogawa, etc.) et allemands (Siemens, Sick, Endress+Hauser, etc.).

En 2011, le Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement jugeait que les

2 – Estimations du BCC citées par le *Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (les filières industrielles stratégiques de l'économie verte)*, 2011. Ces données incluent l'observation satellitaire.

3 – EBlonline, 2015 : *Environmental Testing & Analytical Services*.

1 – Avec notamment des leaders technologiques au niveau européen sur le sous-segment de la qualité de l'air.



marchés de l'analyse des sols et de l'air étaient les plus attractifs pour les entreprises françaises : le premier apparaît encore faiblement concurrentiel, et le second présente un fort potentiel de développement.

Sous-segment de l'analyse environnementale, le diagnostic rapide apparaît comme un marché plus récent⁴, contrairement au marché mature de la mesure en laboratoire, dont le chiffre d'affaires s'élevait à 146 millions d'euros par an en France en 2013⁵. En conséquence, il reste globalement mal évalué. Néanmoins, le rapide développement de la mesure en continu, qui représentait 80 millions d'euros de chiffre d'affaires en 2013 en France⁶, laisse inférer une dynamique de croissance du marché des technologies de diagnostic rapide dans son ensemble.

Elle pourrait être consolidée à l'horizon 2020, son développement apparaît fortement dépendant des avancées réglementaires et normatives. Le renforcement des législations et des objectifs de développement durable (lutte contre les pollutions, préservation des ressources naturelles, protection de la biodiversité, etc.) laisse présager de bonnes perspectives de croissance. Sans toutefois s'ouvrir aux particuliers (kits d'auto-diagnostic) : certains observateurs jugent peu probable le développement d'un marché de masse d'ici 2020, le coût des technologies restant trop élevé et la conscience individuelle

4 – Le mesurage rapide et *in situ* des sols est tout particulièrement un marché de niche.

5 – Hydreos, Onema, Pôle DREAM, Pôle EAU, 2013 : *Intérêts technico – économiques de l'analyse en continu de la qualité de l'eau et des milieux au regard des pratiques actuelles*.

6 – Ibid.

des enjeux sanitaires et environnementaux trop faiblement développée.

Les défis technologiques à relever

Des défis transversaux

Trois enjeux ressortent pour les technologies de diagnostic dans leur ensemble à l'horizon 2020.

Le premier concerne la définition d'indicateurs ou de combinaisons d'indicateurs adaptés aux différentes situations à diagnostiquer, dans le cas notamment de multipollutions qui nécessitent un spectre large d'analyse. Le diagnostic environnemental peut reposer sur une gamme variée d'indicateurs : indicateurs chimiques, bioindicateurs⁷, biomarqueurs⁸.

La question des indicateurs pose plus largement celle de l'adaptation de la technologie de diagnostic rapide à l'usage attendu. Dans ce domaine, les préoccupations actuelles de la métrologie portent sur la définition d'un niveau de granulométrie pertinent, d'un nombre de paramètres adéquat et du rythme de traitement idoine (en continu, périodique, etc.) pour une analyse optimale.

Enfin, les qualités physiques des équipements de diagnostic restent un champ d'amélioration de premier plan. Leur déploiement en milieu difficile (accès compliqué, conditions hostiles) nécessitent notamment de renforcer leur robustesse et leur autonomie énergétique, avec pour objectif de simplifier les besoins en maintenance.

Le développement de capteur à bas coût (investissement et utilisation) est également un facteur de développement de la filière.

Des défis plus spécifiques à l'air

Pour une question de santé publique, la mesure de la qualité de l'air extérieur a nécessité de développer des outils de haute précision et fiabilité, et de ce fait relativement lourds à mettre en œuvre. Avec l'émergence notamment du sujet de la qualité de l'air intérieur, il devient plus pertinent de flexibiliser les instruments de

7 – Organismes sensibles à un polluant donné présentant des effets visibles macroscopiquement ou microscopiquement, afin d'évaluer la qualité d'un milieu (par exemple les lichens).

8 – Changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, qui révèle l'exposition présente ou passée d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant (par exemple, nombre de poissons dans un lac).

mesure pour mieux les adapter aux usages. Cela consiste notamment à viser une précision moins importante en conservant toutefois une qualité suffisante pour l'usage attendu. Ce type de configuration peut s'avérer particulièrement pertinent lorsqu'une décision doit être prise rapidement (diagnostic de la qualité de l'air avant le lancement d'un chantier de rénovation, par exemple).

Des défis plus spécifiques à l'eau

Si la capacité d'analyse et la précision des outils de diagnostic rapide sont limitées par rapport à des analyses en différé, elles s'avèrent souvent suffisantes et assez fiables pour un contrôle ponctuel ou le déclenchement d'une alerte pollution⁹. Les enjeux portent davantage sur le choix de paramètres adéquats pour simplifier le diagnostic¹⁰ et la diminution de l'empreinte environnementale et sanitaire des équipements (réduction des déchets d'analyse, suppression des produits classifiés cancérigènes, etc.)¹¹.

Des défis plus spécifiques aux sols

Les diagnostics rapides des sols restent encore très imprécis et loin de la qualité d'un diagnostic en laboratoire¹². La diversité et l'hétérogénéité des données mesurées ne permettent pas aujourd'hui une démarche de traitement automatique et exhaustive, nécessaire pour obtenir la photographie complète d'un site.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

La nécessité de diminuer le coût global des solutions

Les technologies de diagnostic sont encore perçues comme globalement onéreuses, tous coûts considérés (achat, installation, maintenance, recyclage), même si ces coûts ont tendance à diminuer très rapidement. Or les collectivités et les entreprises cherchent de plus

en plus à rationaliser leurs dépenses. Pour les fournisseurs de technologies, développer des solutions plus accessibles en optimisant les coûts de production et en adaptant la qualité aux usages attendus représente donc un enjeu de premier plan. C'est par ailleurs une condition d'accès au marché de masse des solutions de diagnostic pour les particuliers, aujourd'hui embryonnaire.

L'accompagnement du client, une demande émergente

Devant la diversité des solutions aujourd'hui sur le marché et une réglementation en évolution constante, les clients sont de plus en plus demandeurs de conseils personnalisés¹³. Sur le plan commercial, cela implique de mettre en place une offre complète et adaptée aux besoins des collectivités/entreprises, incluant notamment une expertise en amont de la vente et un SAV. Dans certains cas, cela va jusqu'à proposer une offre complète de service, le produit final étant la donnée et son exploitation et non pas le seul équipement de mesure.

S'inscrire dans des offres intégrées

Le diagnostic rapide peut être conçu comme une brique importante des technologies intelligentes, ouvrant de nouveaux débouchés pour les fournisseurs de technologies de métrologie. Auprès des collectivités et des entreprises, les technologies de diagnostic rapide peuvent notamment être intégrées au sein d'offres plus globales de gestion intelligente de l'eau. Cela passe par des partenariats synergiques entre les industriels de la ville intelligente et les métrologues.

Les enjeux réglementaires

Des technologies tirées par la réglementation

Quelle que soit la matrice concernée, la réglementation constitue le premier levier pour développer le marché du diagnostic environnemental. Ces standards sont définis au niveau européen. En 1996, la directive¹⁴ concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air a soudainement créé un marché dans ce domaine au niveau européen.

9 – Hydreos, Onema, Pôle DREAM, Pôle EAU, 2013 : *Intérêts technico – économiques de l'analyse en continu de la qualité de l'eau et des milieux au regard des pratiques actuelles*.

10 – Les outils de diagnostic rapide pour l'eau affichent généralement une multiplicité de paramètres, avec pour effet de complexifier l'analyse.

11 – L'eau, l'industrie, les nuisances, n°368, janvier 2014 : « Analyse de l'eau – Associer baisse des coûts, délais rapides et qualité de service ».

12 – Vecteur Environnement, GODOY DEL OLMO S., SEMAOUNE P., PLASSART G., novembre 2014 : « Couplage des méthodes géostatistiques et mesures sur site pour améliorer la caractérisation d'un site pollué ».

13 – L'eau, l'industrie, les nuisances, n°368, janvier 2014 : « Analyse de l'eau – Associer baisse des coûts, délais rapides et qualité de service ».

14 – Directive 1996/62/CE.



La directive cadre sur l'eau¹⁵ a également eu un effet levier très fort pour les technologies de diagnostic en imposant l'adoption de « programmes de surveillance », avec l'objectif de réduire les pollutions et mieux contrôler les ressources. Les programmes de surveillance, applicables depuis le 22 décembre 2006, sont eux-mêmes composés de différents programmes : suivis quantitatifs, contrôles de surveillance, contrôles opérationnels... pour chacun des bassins hydrographiques. Leurs résultats sont consultables sur Internet¹⁶.

Pour le diagnostic des sols, les règles sont plus éclatées au sein de différents textes, le principal étant la directive relative aux émissions industrielles¹⁷. Tout l'enjeu pour les fabricants consiste alors à adapter leurs solutions de diagnostic rapide, généralement moins précises que les analyses en laboratoire, aux standards établis par ce cadre réglementaire exigeant.

15 – Directive 2000/60/CE.

16 – Voir : <http://www.surveillance.eaufrance.fr/programmes/>

17 – Directive IED 2010/75/UE.

Un cadre normatif européen toutefois peu lisible à l'international

Lorsqu'une entreprise souhaite commercialiser une solution métrologique à l'étranger, elle est tenue d'obtenir une certification¹⁸ et une homologation¹⁹ du pays-cible. Ce processus est généralement long et coûteux. Or, au niveau mondial, le système de normes européen s'avère particulièrement complexe²⁰, faiblement protecteur et peu lisible. De ce fait, les entreprises rencontrent souvent des difficultés pour faire certifier leurs produits hors de l'Union, malgré l'exigence des normes européennes. Cette situation nuit à leur compétitivité et leurs stratégies commerciales.

Une réglementation pour l'air peu flexible

Elle fixe des normes de précision et de qualité très strictes. Celles-ci ont pour effet d'alourdir les équipements déployés et le prix des solutions pour le client. Elles constituent un facteur bloquant pour le développement d'outils de diagnostic rapide moins précis mais plus adaptés à la prise de décision en temps limité, pour laquelle des mesures dites « indicatives » suffisent. De tels outils moins coûteux permettraient également d'effectuer des diagnostics rapides à grande échelle.

Une réglementation pour l'eau lacunaire

Dans le domaine de la métrologie appliquée à l'eau, l'absence de réglementation et de normes *ad hoc* pour les outils de diagnostic en continu incite peu les industriels européens à les utiliser²¹. C'est un frein pour le développement du diagnostic rapide. Cependant, une norme européenne sur la détermination des performances des capteurs devrait prochainement être publiée.

18 – La certification permet de s'assurer que la solution est en adéquation avec les normes du pays-cible.

19 – L'homologation permet de démontrer que les tests de la solution ont été réalisés dans des conditions conformes à celles du pays cible.

20 – Il repose notamment sur la directive 2009/34/CE relative aux dispositions communes aux instruments de mesurage et aux méthodes de contrôle métrologique.

21 – Hydroeos, Onema, Pôle DREAM, Pôle EAU, 2013 : *Intérêts technico-économiques de l'analyse en continu de la qualité de l'eau et des milieux au regard des pratiques actuelles*.

Analyse AFOM

ATOUTS

Une recherche académique de grande qualité dans tous les domaines relatifs au diagnostic rapide (optique, capteurs, etc.)

Des atouts industriels et un vrai savoir-faire

Des directives européennes ambitieuses pour la préservation et/ou la restauration des ressources naturelles, avec des risques de contentieux et d'amendes en cas de non-atteinte des objectifs

Des PME leader au niveau mondial pour l'air

FAIBLESSES

Un cadre normatif européen complexe et peu lisible à l'international

Une réglementation de l'eau peu incitative pour les industriels

Des solutions de diagnostic rapide dans l'ensemble perçues comme très coûteuses

Une offre industrielle française dispersée

OPPORTUNITÉS

La hausse des standards réglementaires au niveau mondial

Une demande toujours forte dans les pays de l'OCDE

L'émergence d'une conscience environnementale au niveau politique dans des pays comme la Chine

Une demande sociétale de plus en plus forte pour un environnement plus sain

MENACES

Une concurrence forte de pays comme les États-Unis, l'Allemagne et le Japon (tout particulièrement pour l'eau)

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

- Soutenir la structuration d'une offre française dans une filière du diagnostic rapide,
- Porter une réflexion sur les règles européennes de normalisation dans une optique de compétitivité ;
- Mettre en place des incitations réglementaires et financières pour favoriser la mesure en continu de la composition de l'eau et de l'air auprès des industriels.

Aux entreprises :

- Moduler davantage la qualité des solutions de métrologie selon les usages attendus et le prix consenti par les clients ;

- Inscrire ces solutions dans des offres intégrées (gestion intelligente de l'eau, domotique, etc.), en relation avec les leaders industriels des secteurs considérés
- Développer le conseil personnalisé pour faciliter le choix des clients ;
- Rechercher une structuration de filière pour mieux répondre aux différents enjeux.

Aux académiques :

- Renforcer la cartographie des risques potentiels et des solutions adaptées ;
- Travailler la granulométrie des solutions selon les usages ;
- Accroître le travail collaboratif avec les entreprises.

Acteurs clés

Pour l'air

La France est très bien positionnée sur le marché mondial de l'analyse de l'air, grâce en particulier à un vivier de PME dynamiques. Les entreprises du secteur incluent :

- Grands groupes : Endentec (Veolia), Cofely Services (Suez Environnement), etc.
- PME : Environnement SA, Ecomesure, Ecologicsense, Enviro-Option, Ethera, Enexco, Metrohm France, etc.
- Start-up : Airboxlab, Aykow, Netatmo, etc.

La France dispose également de structures de recherche de grande qualité. Celles-ci comprennent notamment l'Institut Pasteur de Lille, dont les recherches portent sur les pathologies liées à la qualité de l'air, le LCQSA, groupe d'intérêt scientifique qui regroupe l'INERIS, le LNE et les Mines de Douai et qui appuie le Ministère de l'écologie sur les questions de surveillance de l'air, ou encore l'ANSES, qui a notamment en charge l'encadrement des pratiques des solutions de métrologie sur le marché. Par ailleurs, l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur réalise un travail d'étude et de documentation sur la qualité de l'air au niveau national.

Pour l'eau

Comme pour l'air, le tissu d'entreprises françaises est composé des filiales de grands opérateurs de services à l'environnement et d'une diversité de PME.

- Grands groupes : Schneider, Endentec (Veolia), Edelway (Suez Environnement), etc.

- PME : Enviro-Option, Bamo Mesure, Izitec, Orchidis, PCE Instruments, Metrohm France, Delta OHM, EFS, 2G Métrologie, Aqualabo, etc.

- Start-up : Klearia, Biomae, AquaMS, Ubertone, etc.

Plusieurs équipes universitaires ont pour domaine de recherche la métrologie des ressources en eau. C'est le cas par exemple du Laboratoire des sciences chimiques de Rennes ou des Mines de Douai. Par ailleurs, les pôles de compétitivité DREAM, EAU et HYDREOS, structures d'interface spécialisées dans la gestion des ressources hydriques, ont entamé en commun une démarche de structuration et contribuent à des projets dans le domaine de l'analyse.

Pour les sols

Marché de niche, le diagnostic rapide des sols est encore tiré par les activités de recherche d'acteurs privés et publics. Les entreprises positionnées sur le marché sont principalement des PME comme Enviro-Option, Secomam, Metrohm France ou Galys. Un certain nombre de laboratoires travaillent également sur la thématique, comme laboratoire de chimie organique, bio-analytique et environnement de l'université de Pau.

À l'interface

Plusieurs structures de R&D conduisent des activités de métrologie portant sur plusieurs milieux. Ces organismes comprennent notamment le BRGM, l'INERIS, le CEA Leti, le LNE, le N.A.N.C.I.E, l'IRSTEA ou encore les pôles de compétitivité Optitec et Route des Lasers dans le domaine de l'optique et de la photonique.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
ENVIRONNEMENT , Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Dépollution, traitement in situ,
traitement sur site, traitement hors site,
biodégradation, venting, bioventing,
extraction rapide triple phase, désorption
thermique, barrières réactives, soilmixing,
phytotechnologies (phytodégradation,
phytostabilisation, phytoextraction)



Définition et périmètre

Définition

Le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie définit par « sol pollué » un sol « *qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement* ». Ces pollutions proviennent généralement d'anciennes pratiques d'élimination des déchets, de fuites et épandages de

produits chimiques ou encore de retombées de rejets atmosphériques accumulés depuis parfois plusieurs années.

Technologies

Les technologies de traitement des sols ont pour objectif de supprimer ou diminuer à un niveau tolérable¹ le niveau de risque de ces sols contaminés. Ces technologies peuvent être segmentées en quatre familles et trois modes de mises en œuvre :

Familles	Physicochimiques <ul style="list-style-type: none">■ <i>Venting</i> : mise en dépression du sol par aspiration puis traitement des gaz extraits■ Lavage des sols : lavage à l'aide d'eau ou d'un solvant■ <i>Stripping</i> : suppression d'un soluté gazeux par l'action d'un gaz laveur■ Solidification/stabilisation : piégeage des polluants, notamment par <i>soil-mixing</i> (utilisation d'un liant)■ Oxydation chimique : injection d'un oxydant dans le sol■ Réduction chimique : injection d'un réducteur dans le sol■ Extraction double/triple-phase : traitement en simultané des polluants gazeux du sol et liquides des nappes phréatiques■ Oxydation hydrothermale supercritique : traitement d'effluents liquides en milieux aqueux
	Thermiques <ul style="list-style-type: none">■ Incinération : combustion aérobie pour destruction des polluants■ Désorption thermique : application de chaleur pour extraction par volatilisation des polluants■ Vitrification : stabilisation des sols par élévation de la température
	Biologiques <ul style="list-style-type: none">■ Biolixiviation : lavage des sols à l'aide d'un produit biologique■ <i>Bioventing</i> : couplage du <i>venting</i> avec l'injection d'organismes qui décomposent biologiquement les contaminants■ Bioréacteur : mélange de sols pollués avec de l'eau et différents additifs■ Bioremédiation : utilisation de (micro)organismes pour transformation des polluants. La bioremédiation inclut les phytotechnologies (utilisation d'espèces végétales et les microorganismes associés).
	Confinement : installation d'une barrière étanche sur le site pour empêcher la propagation des polluants
Modes de mise en œuvre	Traitement <i>in situ</i> (sans excavation) Traitement sur site (avec excavation) Traitement hors site

¹ – En vertu de la note ministérielle du 8 février 2007 relative aux sites et sols pollués, des études d'impact approfondies doivent permettre de fixer des objectifs de dépollution « en fonction de l'usage ultérieur du site ».

Le choix d'une technologie pour la dépollution d'un sol dépend d'une diversité de paramètres : environnement des travaux pour la gestion des nuisances (bruit, pollutions, etc.), taille et encombrement du site, nature et concentration des polluants, fragilité du milieu, coût anticipé, etc. La durée du traitement est notamment un critère capital. Lors d'opérations immobilières nécessitant généralement un traitement rapide, le traitement hors site est préféré dans 95 % des cas en France². Pour les sites industriels, aux délais souvent moins contraints³, le traitement sur site ou *in situ* à l'action plus lente que le traitement hors site est plutôt privilégié.

Les techniques *in situ* représentent à court et moyen termes le principal champ d'innovation dans le secteur de la dépollution des sols. D'une part, les traitements hors-sites sont aujourd'hui globalement bien maîtrisés. D'autre part, l'émergence du concept de « dépollution durable »⁴ amène les acteurs du secteur de la dépollution à se tourner vers les techniques dites « vertes » comme la biodégradation, souvent pratiquées *in situ*. Par ailleurs, ces dernières permettent d'éviter les impacts environnementaux liés à l'excavation et au transport des terres générés lors de l'utilisation de techniques hors site.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La dépollution des sols est un marché en croissance aussi bien en France que dans le reste du monde, et s'accompagne d'enjeux forts en termes de **santé publique** et de **protection de l'environnement**. Dans le cadre du programme FEDER 2014-2020, des financements sont ainsi octroyés à des projets comprenant la dépollution des sols.

Par ailleurs, la France s'inscrit parmi les **leaders du marché**, dispose d'un tissu d'entreprises dynamiques (grands groupes avec une forte implantation à l'international et PME) et de structures de recherche

publiques et privées d'excellence, formant un écosystème d'innovation performant.

Liens avec d'autres technologies clés

Deux technologies ont une influence sur le développement des technologies de traitement des sols pollués :

■ **Technologies de diagnostic rapide (eau, air, sol)** (influence forte) : leur perfectionnement peut permettre d'améliorer l'efficacité des procédés de traitement en renforçant la qualité du diagnostic initial.

■ **Métaomique** (influence forte) : l'étude des écosystèmes peut permettre de renforcer les connaissances scientifiques relatives au comportement des sols, et faciliter ainsi le choix du traitement le plus approprié pour la dépollution.

Le marché

Le marché international de la dépollution des sols est **attractif**. Évalué à 32,4 milliards d'euros en 2012, il s'élèverait à environ 36 milliards en 2015⁵.

Situation en 2015

Dominé par des entreprises américaines (TRS Group, Therma-Flite, etc.), le premier marché mondial reste les **États-Unis**. L'Europe devrait toutefois conserver son **potentiel de croissance** : seulement 15 % des 340 000 sites potentiellement contaminés (localisés pour beaucoup dans les pays de l'est) avaient été traités en 2014⁶.

Les pays émergents représentent également des **marchés porteurs**. En Chine, notamment, le marché est estimé à 5,7 milliards d'euros pour 2015 (15 % du marché mondial)⁷. 28 % des sols de la région du Delta contiendraient des pollutions aux métaux lourds⁸. Par ailleurs, l'urbanisation a un impact positif sur la demande pour les technologies de dépollution, dans la mesure où l'assainissement de sites pollués permet

2 – ADEME, 2009 : *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filière de traitement des sols et eaux souterraines pollués en France*.

3 – Par rapport aux opérations immobilières, qui nécessitent de pouvoir utiliser rapidement le site dépollué, les sites industriels entraînent souvent une réhabilitation à plus long terme.

4 – ADEME, 2009 : *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filière de traitement des sols et eaux souterraines pollués en France*. La dépollution durable consiste à prendre en compte des critères de développement durable à toutes les étapes du processus de dépollution.

5 – Estimations réalisées par l'institut d'études de marché américain *The McGraw-Hill Company* en 2012.

6 – Commission Européenne, 2014 : *Progress in the management of Contaminated Sites in Europe*.

7 – Données de *China Securities Journal*.

8 – Market Watch, 15/07/2013 : "China's Guangdong comes clean on soil pollution".

de libérer de nouveaux terrains pour l'aménagement d'espaces résidentiels ou de commerce.

En France, le marché de la dépollution a **rapidement progressé** depuis le début des années 2000 (+ 6,5 % par an en moyenne entre 2005 et 2012)⁹, atteignant 470 millions d'euros en 2010¹⁰. Le chiffre d'affaires de l'Union des professionnels de la dépollution des sites (UPDS), qui représente 2/3 du marché de la dépollution, a été multiplié par 3 entre 2002 et 2012¹¹. L'activité est notamment tirée par le processus de désindustrialisation, qui ouvre de nouveaux chantiers de reconversion (40 % des sites pollués se situent en Île-de-France, dans le Nord-Pas-de-Calais et en Rhône-Alpes). Si les entreprises leader au niveau mondial sont américaines ou australiennes (Xylem, AECOM, Cardno, etc.), certaines entreprises françaises comme GRS Valtech, Sita Remédiation ou Serpol sont bien implantées sur le marché européen.

Perspectives pour 2020

Malgré un infléchissement de la croissance en 2014, dû en particulier à la contraction de la commande publique¹², les **prévisions sont optimistes à moyen terme**. Le chiffre d'affaires du secteur devrait progresser de 4 à 7 % par an entre 2015 et 2020 en France, grâce en particulier à un contexte législatif et réglementaire favorable (Loi ALUR)¹³.

Des segments de marché aux marges du secteur des sites et sols pollués pourraient s'avérer particulièrement prometteurs, comme par exemple celui de la **gestion des boues de curage et de dragage**¹⁴. Tous les ans en France, 50 millions de m³ sont dragués en moyenne dans les ports¹⁵ et 900 000 tonnes par an de boues de curage sont produites¹⁶. Quand ces



boues sont sans danger pour l'homme, elles sont valorisées sous une forme agricole (fertilisation des sols) ou industrielle (fabrication de briques, construction de panneaux d'isolation, construction routière, etc.), des débouchés qui offrent des perspectives intéressantes de croissance.

Tendances d'usage

Sur le plan technologique, le **traitement biologique hors site**¹⁷ et le **venting / bioventing in situ** restaient les deux techniques les plus utilisées en 2012 en France (60 % des terres traitées)¹⁸. Comme le *venting*, d'autres techniques développées dans les années 2000 sont aujourd'hui couramment utilisées, telle l'extraction rapide triple phase sur site. Encore en perfectionnement, certaines technologies plus récentes sont proposées par un nombre croissant d'industriels, appréciant leurs atouts économiques et environnementaux. C'est le cas notamment de la désorption thermique¹⁹ ou encore des barrières

9 – Xerfi, 2013 : *La réhabilitation des sites et des sols pollués*.

10 – SOeS.

11 – Données UPDS.

12 – Ibid.

13 – La loi ALUR introduit notamment le principe du « tiers payeur » : lorsqu'un exploitant propriétaire cède un terrain à un tiers, celui-ci doit définir l'usage envisagé et présenter un mémoire de réhabilitation qui justifie ses capacités financières et techniques.

14 – Boues issues de l'entretien des réseaux d'assainissement industriels, autonomes et de la vidange des fosses. Elles proviennent de 2 opérations : le dragage (extraction des matériaux) et le curage (nettoyage des sédiments).

15 – Données IFREMER.

16 – Données Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (ASTEE).

17 – Biodégradation des sols assurée par des (micro)organismes hors site.

18 – Données de l'ADEME.

19 – Volatilisation des polluants par chauffage. Cette technologie est particulièrement bien adaptée pour les hydrocarbures.



réactives pour le traitement des panaches de nappes phréatiques²⁰.

Enfin, **certaines technologies émergentes** en France ouvrent des voies prometteuses pour l'avenir du secteur, comme l'utilisation de mousses de surfactants pour le traitement de sols contaminés ou les phytotechnologies (phytodégradation, phytostabilisation, phytoextraction). Performantes pour le traitement des métaux lourds et considérées comme des technologies « vertes »²¹, les phytotechnologies restent toutefois utilisées pour l'essentiel dans le traitement des eaux usées, contrairement à d'autres pays comme le Canada ou les États-Unis où elles sont développées à l'échelle industrielle pour le traitement des sols. Selon le bureau d'étude et d'ingénierie spécialisé dans la gestion des sites et sols pollués IDDEA Ingénierie, deux raisons peuvent notamment expliquer cet état de fait²² :

20 – Interception d'un panache de pollution par l'implantation d'une barrière perméable depuis la surface du sol jusqu'à la base de l'aquifère.

21 – Xerfi, 2013 : *La réhabilitation des sites et des sols pollués*. Leur développement devrait être en partie tiré par la commande publique. Les phytotechnologies représentent en effet l'opportunité pour les acheteurs publics de remplir leur fonction d'éco-exemplarité en ayant recours à ces techniques de dépollution « verte »

22 – Actu-Environnement, 17/06/2013 : « Phytoremédiation : le projet phytocane, enjeux et perspectives ».

- La lenteur du traitement, qui incite les opérateurs à privilégier des techniques plus rapides.

- Le besoin de constituer des équipes interdisciplinaires aussi bien pour la recherche que pour les applications.

Les défis technologiques à relever

L'enjeu du diagnostic

Le **perfectionnement des techniques de diagnostic** utilisées avant, pendant et après l'opération de traitement apparaît comme un chantier essentiel.

- Le diagnostic préalable aux travaux demeure parfois imprécis ou partiel. Le renforcement des connaissances scientifiques sur la toxicité des pollutions pourrait notamment permettre de l'améliorer. Cet aspect reste très lié à la qualité des études historiques, souvent difficiles à conduire.

- Un suivi en continu de l'évolution des sols est également utile lors du traitement. En ce sens, des outils d'aide à la décision de plus en plus sophistiqués sont utilisés par les industriels. Ils permettent de mieux anticiper les ressources mobilisées ou faciliter le passage d'une technique de dépollution à une autre, dans le cas notamment de situations de multi pollution.

- En aval, les évaluations de résultats s'avèrent essentielles pour démontrer la performance de techniques peu matures auprès de la maîtrise d'ouvrage. Pour des traitements de long terme, comme lors de l'utilisation de technologies *in situ*, ces évaluations sont toutefois compliquées à mettre en œuvre.

Réduire l'empreinte environnementale de la dépollution

La diminution de l'**impact environnemental des traitements** est également un enjeu de premier plan. Elle passe notamment par la maîtrise des consommations d'énergie, la réutilisation des terres traitées, le choix d'agents chimiques respectueux de la biodiversité, la restauration des fonctions des sols après le traitement et la diminution des transferts de pollution du sol vers l'air. Elle constitue un axe de progression particulièrement fort pour les techniques hors site, qui entraînent le transport de terres contaminées du site pollué au centre de traitement et induisent de ce fait des consommations d'énergie et de ressources supplémentaires.

Gérer les pollutions difficiles

L'amélioration du traitement à grande échelle des **pollutions dites « difficiles »** constitue enfin un défi majeur pour le secteur. Ces situations difficiles incluent par exemple les cas de pollutions inorganiques (aux métaux par exemple) ou les cas de pollutions multiples d'un sol, qui peuvent nécessiter la combinaison de plusieurs techniques de traitement.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les enjeux de l'internationalisation

Actuellement, la concurrence de plus en plus intense sur le marché français pousse les entreprises françaises à rechercher de **nouveaux débouchés à l'international**. Si la présence d'une offre locale bien développée limite les opportunités de croissance en Amérique du Nord et en Australie, les acteurs historiques du marché français de la dépollution sont déjà bien implantés en Europe et dans les pays émergents²³. Pour les nouveaux entrants du secteur, l'internationalisation nécessitera le déploiement d'équipes commerciales dans les pays-cibles. Dans les pays émergents, les acteurs français devront composer avec la structuration d'une offre locale de dépollution des sols.

Étendre l'offre de services

Pour capter de nouveaux marchés et traiter des situations de pollution toujours nouvelles, certaines entreprises font également le choix d'étendre leur gamme de prestations. À titre d'exemple, Veolia se positionne depuis 2013 sur le marché de la dépollution post-démantèlement des centrales nucléaires. Si une stratégie de diversification est adoptée par d'autres acteurs, cette stratégie devrait entraîner une reconfiguration de leur offre dans les prochaines années.

Les enjeux réglementaires

Un cadre réglementaire favorable

La politique française dans le domaine des sites et sols pollués s'appuie sur un nombre limité de principes, permettant d'aborder ce problème de manière claire et raisonnée : démarche de prévention des pollutions futures, connaissance des risques potentiels

23 – ADEME, 2011 : *Le savoir-faire français dans le domaine de la dépollution des sols et des eaux souterraines*.

et traitement adapté à l'impact effectif du site sur l'environnement et à l'usage auquel il est destiné. Plusieurs guides méthodologiques ont été élaborés par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, en collaboration avec l'ADEME (circulaires du 8 février 2007).

Le contexte réglementaire en France s'avère ainsi propice au développement du marché. En permettant à un exploitant industriel de transférer la responsabilité de la dépollution à un « tiers intéressé », la loi ALUR²⁴ a modifié sensiblement le droit des installations classées pour la protection de l'environnement et permis de fluidifier un cadre réglementaire jusque-là flou. Cette mesure devrait stimuler le marché. En effet, l'obligation de remettre un site industriel en état en fin d'activité peut désormais être endossée par un autre débiteur (comme les promoteurs) que l'exploitant, tant que le premier justifie de ses capacités techniques et financières pour assurer les travaux de dépollution.

Avant cette mesure, les promoteurs assumaient la plupart du temps la maîtrise d'ouvrage de ces travaux sans base légale solide. Cette situation incitait peu le lancement de projets sur des sites pollués²⁵.

Des normes qui se renforcent

Un cadre normatif est également en train d'être construit depuis le début des années 2010. Un référentiel de certification des prestations a été élaboré par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) en 2011. Les nouvelles technologies mises sur le marché peuvent également être « labellisées » au niveau européen par l'*Environmental Technology Verification* (ETV) depuis 2015. Ces démarches sont capitales pour « rassurer » la maîtrise d'ouvrage sur la qualité des travaux réalisés, en particulier lorsque des techniques encore peu matures sont mises en œuvre.

À l'international, le durcissement des normes environnementales dans les pays émergents devrait par ailleurs stimuler la demande sur ces marchés.

24 – Loi n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové.

25 – FIDAL, 21/03/2014 : « Le marché de la dépollution est relancé par la loi «ALUR» ».

Analyse AFOM

ATOUTS

Des groupes bien implantés sur le marché européen et les marchés émergents.

Un écosystème d'innovation performant.

Une réglementation favorable au développement d'une filière de la dépollution.

FAIBLESSES

Une concurrence exacerbée sur le marché français.

Une absence de leadership industriel sur la phytoremédiation par rapport à d'autres pays de l'OCDE (États-Unis, Allemagne, etc.).

OPPORTUNITÉS

Des débouchés à l'international, en particulier dans certains pays émergents.

Des pressions sur le foncier incitant à la dépollution de sites pour l'aménagement d'espaces de vie.

Des possibilités pour les entreprises d'étendre leur expertise pour répondre à des nouvelles situations de pollution.

MENACES

Une contraction possible de la commande publique.

Une concurrence forte, notamment d'entreprises locales dans les pays émergents.

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

- Soutenir les technologies de dépollution émergentes en France pour stimuler le secteur. À titre d'exemple, la phytoremédiation reste une technologie encore trop peu explorée en France par rapport aux États-Unis, à l'Allemagne ou les Pays-Bas, alors même que l'impact environnemental s'affirme comme une préoccupation croissante de la maîtrise d'ouvrage ;
- Mettre en place des dispositifs incitatifs à destination des acheteurs publics ;

Aux entreprises :

- Déployer/renforcer les équipes dans les pays porteurs ;
- Engager une réflexion stratégique sur les voies de diversification possibles pour les entreprises ;

Aux académiques :

- Mettre en place des plateformes de démonstration pour les technologies émergentes.
-

Acteurs clés

Représentés notamment par l'UPDS, les entreprises du secteur de la dépollution des sols regroupent :

- Des groupes internationaux, pour certains très bien positionnés sur les marchés mondiaux : filiales d'opérateurs de services à l'environnement européen (Seché Environnement, Colas Environnement, Suez Environnement, Veolia, etc.), groupes du BTP (Bouygues, Vinci, Ramery Environnement, etc.), acteurs spécialisés (Serpoll, Valgo, Silex International, Biogénie Europe, etc.), ingénieristes (Artelia, Egis, Burgeap, Socotec, Antéa France, etc.).
- Des bureaux d'études, au niveau ingénierie : Apave, Antéa Group, Burgeap, Bureau Veritas, etc.

■ Des PME : Soléo Services, Sol Environnement, Kidova, Geovariance, Phytorestore, Biobasic Environnement, IDDEA Ingénierie, etc.

■ Des start-ups : IVEA, etc.

La France dispose également d'un tissu de recherche d'excellence, avec notamment le BRGM, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), le réseau RECORD, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), les pôles de compétitivité AXELERA et TEAM², le Groupement d'intérêt scientifique sur les friches industrielles (GIFSI) en Lorraine, le Département Génie civil et environnemental des Mines de Douai ou encore l'Institut national de recherche agronomique (INRA).

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

38 Systèmes de rénovation du bâti existant

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, HABITAT , Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Habitat, rénovation, efficacité énergétique



Définition et périmètre

Les rénovations des bâtiments prennent de plus en plus en compte l'amélioration des performances énergétiques. Les cinq cibles prioritaires de la rénovation énergétique mentionnées dans la démarche OPEN (Observatoire permanent de l'amélioration énergétique des bâtiments) de l'Ademe sont les suivants :

- toiture ;
- agencement (cloison, isolation, plâtrerie, plafond) ;
- ouverture (portes, fenêtres, volets, véranda) ;
- chauffage (chauffage, eau chaude, ventilation, climatisation) ;
- façade (ravalement, crépis, bardage, isolation façade).

Les systèmes de rénovation du bâti existant doivent permettre une rénovation rapide, sans perte importante de volume habitable et doivent être déployables par des PME.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Un tiers des émissions de CO₂ sur le sol français provient du gaspillage énergétique des bâtiments. L'efficacité énergétique des bâtiments est donc un enjeu prioritaire. Or la part du neuf dans le parc immobilier français est faible (les logements construits en 2012 représentent moins de 1 % du parc immobilier en 2012 d'après les données de l'Ademe (Chiffres clés du bâtiment, 2013)). Ainsi, il existe un véritable enjeu pour la rénovation thermique du bâti existant.

La rénovation thermique des bâtiments fait d'ailleurs partie des 34 plans de la Nouvelle France Industrielle et des neuf solutions de l'industrie du Futur, dont la Ville durable.

Les technologies d'isolation ou de production d'énergie en elles-mêmes ont atteint un bon niveau de performances techniques. Il est nécessaire de veiller à leur accessibilité financière comme à la qualité des installations et à leur durabilité. Ce sont donc surtout les technologies permettant une mise en œuvre facile, nécessitant notamment peu de formation et apportant un gain de temps lors de l'installation pour limiter le coût final de rénovation qui sont indispensables pour atteindre les objectifs ambitieux de rénovation sur le territoire.

Liens avec d'autres technologies clés

Cette technologie est significativement liée à la modélisation, simulation et ingénierie numérique (4), en particulier avec l'essor attendu du BIM (Building Information Model) pour faciliter les chantiers de rénovation, mais aussi pour bénéficier d'aide à la décision sur les systèmes à rénover grâce à des simulations pointues. Pour les mêmes raisons, les systèmes de rénovation du bâti existant sont influencés par les technologies immersives (14) qui permettent des visites virtuelles de logements et de bâtiments. Par exemple, Bouygues Construction intègre depuis plusieurs années les technologies immersives dans ses offres commerciales : superposition d'une image en 3D à un plan permettant de se déplacer dans la maquette du bâtiment et d'y apporter des changements en temps réel.

La technologie est également liée aux systèmes constructifs à haute qualité environnementale (39) dans la mesure où des techniques ou technologies peuvent être adaptées à la fois aux bâtiments neufs et aux bâtiments rénovés, notamment sur l'utilisation de produits biosourcés.

Les marchés

Au niveau européen, le marché de la construction (y compris travaux publics) représente 1 211 Md € de chiffre d'affaires en 2014. La réhabilitation et la maintenance des logements représentent 28 % soit 339,1 Md €¹.

En France, le gisement de rénovation représente 30 millions de logements.

En 2013, le marché OPEN (tel que défini ci-dessus) concerne 46 % des 9,7 millions de logements rénovés soit environ 4,5 millions de logements et 16,6 Md €. La majorité des travaux ne concernent pas la totalité du logement, ce qui explique le décalage avec les chiffres présentés plus haut qui considèrent une rénovation globale. Sur ces 4,5 millions de logements, seulement 200 000 logements par an sont rénovés dans leur ensemble² afin d'améliorer leurs performances énergétiques et de les placer presque au même niveau d'exigence que les logements neufs, tout en respectant leur valeur patrimoniale et architecturale et en veillant à appliquer des solutions qui ne génèrent pas de dégradation du bâti existant.

1 – FIEC, 2015 : *Key figures 2014*

2 – Gouvernement français, 2013 : *La nouvelle France industrielle, présentation des feuilles de route des 34 plans*

D'après l'OPEN, le poste « Ouverture » représente, en 2013, 40 % des travaux de rénovation avec un impact sur les performances énergétiques du bâti.

D'après son étude sur les marchés de la rénovation énergétique dans le tertiaire, le cabinet Coda Strategies table sur un parc rénové de 16 % d'ici 2019, soit 160 millions de mètres carrés. Une hypothèse basse, argumentée par les incertitudes économiques et celles du périmètre retenu dans l'éventuel décret sur l'obligation de travaux³.

En France, le plan de rénovation énergétique du bâtiment lancé par le gouvernement donne pour objectif 500 000 rénovations par an à partir de 2017. Les segments moteurs attendus sont la maison individuelle et les bâtiments de logements collectifs avec un seul propriétaire. Ainsi l'objectif fixé se découpe en la rénovation de 380 000 logements privés par an et 120 000 logements sociaux par an.

Les défis technologiques à relever

Cinq postes majeurs de travail sont ciblés pour l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un bâtiment rénové. Par exemple, des technologies rapides existent pour la rénovation des fenêtres et leur existence fait du changement de fenêtre une opération de routine menée en masse

Le principal enjeu actuel est de passer à la rénovation de toute les parois avec une approche similaire à celle mise en place pour les fenêtres : choix sur catalogue, préfabrication sur mesure, rapidité de pose.

Le panneau d'isolants sous vide (PIV) représente une nouvelle génération d'isolant combinant excellentes performances thermiques et faible encombrement en comparaison des techniques d'isolation traditionnelles. À titre d'exemple, 1 cm de PIV est équivalent à 6 cm de polystyrène expansé ou 9 cm de laine minérale⁴. Plusieurs freins subsistent néanmoins. Notamment, le matériau est délicat à manipuler et à intégrer au bâti car il est fragile, ne peut être découpé et doit être intégré sur des surfaces planes. De plus, ce matériau est actuellement cher. Ces verrous font l'objet de recherche, à l'image du projet VIPeR démarré en 2013 et

3 – Source : Le Moniteur ; 17 avril 2015.

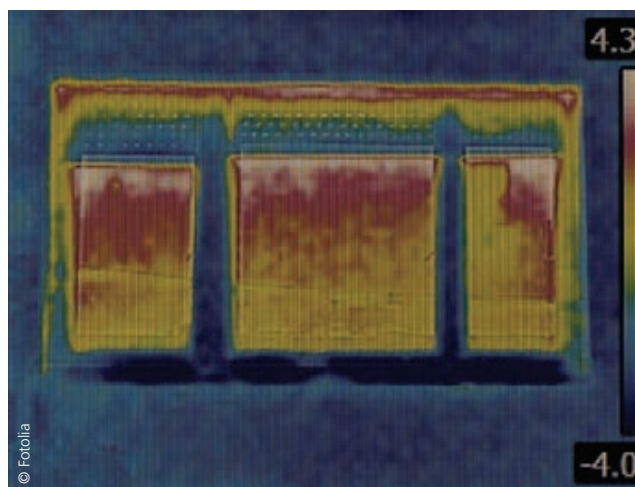
4 – <http://isolation.comprendrechoisir.com/comprendre/piv>

financé par l'ADEME dans le cadre du programme énergies décarbonées des investissements d'avenir.

Le développement des technologies 3D, ou du calepinage numérique, doit aussi permettre d'augmenter la productivité des chantiers de rénovation. Il s'agit de reconstruire rapidement en 3D (avec le support généralement du BIM – Building Information Model) l'environnement à rénover. Le passage au numérique permet d'accélérer la production à façon des pièces de rénovation. Des mesures précises et une production de pièces tout aussi précise assurent aussi la performance énergétique des rénovations, par exemple en diminuant les ponts thermiques et en améliorant l'étanchéité à l'air. De telles solutions existent pour les cuisinistes ou pour les installateurs de fenêtre et devraient se développer dans les autres applications de la rénovation.

Les technologies de mesure dimensionnelle existent sur le marché (technique de numérisation 3D). L'effort porte surtout sur les moyens de reconstruction automatique (modélisation) sous CAO, à partir des mesures terrain, et sur la communication avec les systèmes de production de pièces de rénovation, sous forme de plateforme collaborative gérée par le BIM.

Le développement de la domotique permet d'intégrer facilement des solutions performantes dans la rénovation, notamment avec les équipements de chauffage connectés qui seront pilotables à distance par tablette ou smartphone. Le principal obstacle concerne alors les protocoles de communication entre les équipements de l'habitat et les compteurs d'énergie. La création d'un métalangage pour un nouvel équipement positionné entre le compteur d'énergie et les équipements de l'habitat peut aider à résoudre ces problèmes d'interfaçage.



Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'enjeu commercial est fort pour développer l'intérêt des ménages pour les travaux de rénovation pour l'amélioration des performances énergétiques. Les technologies doivent susciter l'envie en mettant en avant un ensemble de fonctions : décoration, isolation thermique, confort thermique et acoustique, étanchéité à l'air... La rapidité de réalisation et la garantie du résultat doivent donner confiance à l'acheteur.

Une offre packagée proposée par des regroupements d'artisans faciliterait également la décision d'achat en garantissant l'accompagnement sur une vision globale de la rénovation avec un seul interlocuteur.

L'article 4bis de la loi sur la transition énergétique a imposé la mise en place du carnet de santé numérique de suivi et d'entretien. Obligatoire (article L 111-10-5 du Code de la construction) dès 2017 pour toutes les constructions neuves, il sera obligatoire pour tous les biens immobiliers vendus en 2025. Il intégrera :

- Le diagnostic de performance énergétique (DPE),
- L'état des installations intérieures de gaz et d'électricité,
- Le constat de risque d'exposition au plomb,
- L'état mentionnant la présence ou l'absence de matériaux ou produits contenant de l'amiante,
- L'état relatif à la présence de termites,
- L'état des risques naturels technologiques, etc.

Il permettrait également d'enregistrer les travaux effectués au cours de la vie du bâtiment. Les technologies de BIM (Building Information Model) sont en développement pour ces applications, mais cela nécessite aussi une organisation adéquate de la filière, sur laquelle le Plan Bâtiment Durable et le Conseil National de l'Industrie travaillent aussi.

Faisant suite au plan de construction, Sylvia Pinel a lancé courant 2015 trois programmes :

- le programme d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique (PACTE) doté de 30 millions d'euros ;
- le plan Transition numérique du bâtiment doté de 20 millions d'euros;

- le plan de recherche et de développement pour le traitement de l'amiante dans le bâtiment doté de 20 millions d'euros.

Le PTNB (programme interministériel) programmé pour trois ans a pour objectif de disposer d'un **effet levier pour atteindre les objectifs de numérisation de la filière bâtiment et de massification de la construction**, ceci se faisant autour de trois grands axes :

- Expérimenter, capitaliser, convaincre pour donner envie à tous les acteurs ;
- Accompagner la montée en compétences des professionnels et impulser le développement d'outils adaptés aux petits projets ;
- Développer un écosystème numérique de confiance.

Parmi les actions à réaliser dans le cadre du PTNB, certaines ont été repérées comme prioritaires :

■ Le BIM pour tous : Développement d'outils numériques de bureaux et de chantier à destination des petites et moyennes structures.

Cette action vise à mettre au point des kits BIM (offre matérielle, logicielle et services) calés sur les besoins des TPE/PME et notamment des artisans du bâtiment, afin d'éviter la césure de la filière entre ceux qui peuvent suivre la dynamique de la numérisation et les autres.

■ **Le carnet numérique de suivi et d'entretien du logement.** À rappeler que la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte prévoit la création d'un carnet de suivi et d'entretien du logement obligatoire pour toute construction neuve à compter du 1^{er} janvier 2017.

■ **La normalisation des processus et des échanges.** L'enjeu de cette action est de préserver et de renforcer la spécificité de la filière bâtiment française constituée en grande partie de petites et moyennes entreprises et ceci face aux grandes structures étrangères.

La numérisation de l'existant pour la rénovation et l'exploitation des ouvrages.

Il existe des outils facilitant la numérisation du bâti existant (laserométrie, Scan 3d, photogrammétrie, thermographie, infrarouge, etc.). Ces briques devraient permettre à terme pour des bâtiments conçus sans maquette numérique d'en disposer permettant par la même occasion une gestion optimisée du bâtiment.

Les enjeux réglementaires

La rénovation de l'habitat a déjà été identifiée par les pouvoirs publics comme un enjeu fort dans le cadre de la transition énergétique. Un plan d'investissement pour le logement a été présenté par le Président de la République le 21 mars 2013. Il décline notamment le plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH), plan d'actions de l'État mis en place pour atteindre l'objectif de rénover 500 000 logements par an à l'horizon 2017.

La loi de transition énergétique pour la croissance verte a été promulguée le 17 août 2015. Les dispositions impactant dès à présent le secteur de la construction sont les suivantes⁵ :

- Construction des bâtiments à caractéristiques énergétiques et environnementales renforcées : le plan local d'urbanisme peut imposer aux constructions de couvrir une part de leur consommation d'énergie par la production d'énergie renouvelable (Article 8-I).
- État exemplaire – Économies d'énergie : Mise en place d'actions de sensibilisation à la maîtrise de la consommation d'énergie auprès des utilisateurs des nouvelles constructions de l'État, de ses établissements publics et des collectivités territoriales (Article 8-II).
- Expérimentations et innovations en matière d'économies d'énergies : les collectivités et établissements publics établissant un Plan climat énergie territorial peuvent conclure un partenariat avec les établissements publics à caractère scientifique, culturel et professionnel (universités, grandes écoles,...) à cette fin (Article 8-III).
- Conditions de performance énergétique minimale s'appliquant aux logements sociaux vendus à des personnes physiques : extension aux logements individuels des dispositions actuellement en vigueur pour les logements collectifs, bénéficiant le plus souvent à des accédants issus du parc social (Article 13).
- Maintien des aides aux travaux d'amélioration de la performance énergétique quand il y a obligation de travaux : pour faciliter la réalisation des travaux (Article 14-II).
- Copropriétés – vote à la majorité simple des travaux de rénovation énergétique : dans les bâtiments en copropriété, simplification des opérations d'amélioration de l'efficacité énergétique à l'occasion de travaux affectant les parties communes (Article 14-IV).

5 – Source : MEDDE (ministère en charge de l'écologie).

■ Simplification de l'application de la réglementation thermique aux nouvelles constructions : les organismes certificateurs spécialisés dans la performance énergétique des bâtiments peuvent délivrer l'attestation de prise en compte de la réglementation thermique à la fin d'un chantier de construction, lorsqu'ils signent une convention à cet effet avec l'Etat, ce qui simplifie les démarches pour la construction de bâtiments certifiés (Article 15).

■ Mise en place des plateformes territoriales de la rénovation énergétique : définition de leurs missions et renforcement de l'accompagnement technique et financier proposé aux particuliers lors de leurs travaux de rénovation énergétique. Cela inclut ainsi le réseau existant des 450 Points Rénovation Info Service qui couvrent l'ensemble du territoire (Article 22).

■ Information des consommateurs sur leurs frais réels de chauffage et facturation selon leur consommation réelle : généralisation de l'obligation d'individualisation des frais de chauffage dans les immeubles pourvus d'une installation collective de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire (Article 26).

■ Soutien aux véhicules à faibles émissions : Les collectivités peuvent prévoir dans les plans locaux d'urbanisme que le nombre de places de stationnement exigé ordinairement soit réduit d'au moins 15 % en contrepartie de la mise à disposition de véhicules électriques en autopartage. Il s'agit d'encourager les promoteurs immobiliers à s'associer avec des opérateurs de location de véhicules propres en libre-service (Article 42).

Les textes portant l'éco-conditionnalité des aides publiques de l'État que sont le CITE (Crédit d'impôt pour la transition énergétique) et l'Eco-PTZ (éco-prêt à taux zéro) ont été publiés au Journal officiel en date du 18 juillet 2014. Ils précisent les critères de qualification (notamment la qualification RGE «Reconnu garant de l'environnement») à remplir par les professionnels. Compte tenu des besoins du marché et de la nécessité d'accompagner l'émergence d'une économie verte autour du bâtiment, des mesures visant à fluidifier l'accès des entreprises au label RGE sans pour autant dégrader le niveau d'exigences sont en cours d'examen.

Enfin, au niveau international, la présence de représentants de la France au sein des comités décisionnaires du cadre normatif des technologies liées au BIM (Building Information Modeling) doit être maintenue afin de garantir la possibilité d'exportation des systèmes développés en France.

Analyse AFOM

ATOUTS

Grande pratique de l'isolation thermique par l'intérieur ou par l'extérieur

Fort réseau d'artisans capables d'intervenir localement

FAIBLESSES

Nécessité de porter une offre qui dépasse le métier actuel d'un artisan

OPPORTUNITÉS

Existence d'incitations fiscales

MENACES

Baisse du prix de l'énergie, qui diminue le retour sur investissement des travaux de rénovation énergétique

Solvabilité des ménages incertaine

Crainte d'une instabilité fiscale par une partie de la profession

Facteurs clés de succès et recommandations

Aujourd'hui, de nombreuses études ont été réalisées afin de déterminer les principaux postes à rénover, les objectifs de performance à atteindre ou encore de comparer l'impact d'une rénovation en une seule fois par rapport à une rénovation en plusieurs étapes. Le sujet est bien pris en main et doit maintenant se doter d'outils technologiques, organisationnels et réglementaires performants favorisant le déploiement de la rénovation à grande échelle.

Le développement des technologies rapides de rénovation pourra être favorisé par le financement d'appels à projets (ADEME, PREBAT...).

L'optimisation des modes organisationnels des maîtres d'œuvre permettra un accès facilité des ménages à la rénovation énergétique⁶. Les organisations à privilégier seront des regroupements tels que les groupements momentanés, les

groupements permanents ou les actions groupées non contractuelles. De plus, des offres adaptées aux différents bâtiments (logement individuel, copropriété, lotissement, petit tertiaire...) devront être conçues et mises en avant par les acteurs de la construction.

Les pouvoirs publics pourront accélérer la généralisation des regroupements d'artisans en faisant la promotion, en adaptant les régimes juridiques notamment en termes de responsabilité au sein des groupements momentanés d'entreprises et en développant des méthodologies pour choisir la forme de regroupement adaptée en fonction des situations.

Afin de promouvoir la rénovation énergétique de qualité, il est nécessaire de rendre davantage visible le label RGE et de développer des documents harmonisés pour l'ensemble des acteurs dans le but de construire un mouvement cohérent.

La formation des professionnels est également essentielle pour garantir une rénovation favori-

6 – Basili S., Nappi-Choulet I., 2014 : *Rénovation Énergétique et Filière Bâtiment* (dans le cadre du débat national sur la transition énergétique)

sant réellement la performance énergétique. En ce sens, l'axe 2 du programme PACTE (moderniser les règles de l'art de la conception) et différentes actions PTNB (plan transition numérique dans le bâtiment qui a notamment pour mission d'adapter les formations initiales et continues) vont renforcer les outils pédagogiques et les formations à destination des professionnels. Le rapport « Rénovation Énergétique et Filière Bâtiment » insiste sur le

développement d'outils numériques (de type e-learning) basés sur une participation collaborative permettant une diffusion au plus grand nombre et une appropriation plus efficace des différents enseignements.

Enfin, les efforts en matière d'incitation fiscale sont à poursuivre dans le but d'aider les ménages (payeurs finaux) à financer leur projet de rénovation.

Acteurs clés

Fabricants de produits de construction : Saint-Gobain, Lafarge, Vicat

Acteurs de la distribution de matériaux : Point P

Constructeurs de maisons individuelles se positionnant sur la rénovation : Maison France Confort, Siniat

Industriels de la pose des fenêtres : Tryba

Industriels du calepinage numérique : Procal, FS2I

Groupements de maîtres d'œuvre : Bâtir Eco, Domocreuse

Entreprises de services en lien avec les performances énergétiques : Delta Dore

Centres techniques industriels : CERIB (Centre d'étude et de recherche de l'industrie du béton), FCBA (Institut technologique forêt cellulose bois-construction Ameublement), CTICM (Centre technique industriel de la construction métallique), CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), Tipee (plateforme technologique dédiée à la réhabilitation des bâtiments)

ITE : INEF4

Pôle de compétitivité : Fibres Energievie

Association : Thermorenov

Autre : ANAH (Agence nationale de l'habitat)

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

39

39 Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, HABITAT , Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Habitat, HQE, système constructif,
BEPOS, Analyse de cycle de vie,
impact environnemental, énergie
grise, éco-conception



Définition et périmètre

La Haute Qualité Environnementale (HQE) des bâtiments est une démarche de management de projet visant la réalisation de bâtiments en maîtrisant son impact sur l'environnement extérieur tout en assurant un environnement intérieur confortable et sain. La démarche HQE comprend trois volets indissociables¹ :

- Un système de management environnemental de l'opération (SME) où le maître d'ouvrage fixe ses objectifs pour l'opération et précise le rôle des différents acteurs.
- 14 cibles qui permettent de structurer la réponse technique, architecturale et économique aux objectifs du maître d'ouvrage.
- Des indicateurs de performance.

Ces trois volets constituent le référentiel générique de la démarche HQE formalisé dans trois documents normatifs : les normes NF P01-020-1 et XP P01-020-3 et le guide d'application (GA) P 01 030.

Pour les systèmes constructifs, cela se traduit notamment par le recours à des matériaux reconnus comme étant à faible impact environnemental selon une analyse de cycle de vie, des associations innovantes de matériaux associant les qualités de chacune (par exemple bois/béton), des modes de construction plus industrialisés (pré-fabrication par exemple), des solutions requérant moins de matière, des matériaux plus facilement réutilisables, des matériaux émettant moins de polluants dans l'air intérieur... Le point clé est l'éco-conception globale du système constructif et du bâtiment dans son ensemble.

Les systèmes constructifs bois sont aujourd'hui qualifiés et donc moins détaillés dans la présente fiche technologies clés. Le plan d'actions techniques de la DHUP² a permis de démontrer la capacité des solutions bois à répondre aux exigences techniques et réglementaires du secteur du bâtiment.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les référentiels et certifications des bâtiments neufs sont en train d'évoluer vers la prise en compte des impacts environnementaux reposant sur une analyse multicritère

1 – Source : Association HQE.

2 – Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages – Ministère de l'écologie du développement durable et de l'écologie (MEDDE).

(consommation d'énergie, émission de gaz à effet de serre, production de déchets, consommation d'eau, etc.) sur le cycle de vie du bâtiment, à l'instar des travaux démarrés au printemps 2015 par la DHUP avec les professionnels du secteur du bâtiment pour la création d'un référentiel d'évaluation de la performance environnementale du bâtiment neuf sur son cycle de vie.

Des réflexions sont menées par le groupe de travail RBR (Réflexion bâtiment responsable, groupe de travail du Plan bâtiment durable, lui-même chargé par les ministères du logement et de l'énergie de mettre en œuvre et de piloter le nouveau plan de performance énergétique des bâtiments). Dans son rapport publié en 2014³, il met l'accent sur trois éléments :

- Ne pas se limiter à la seule efficacité énergétique mais aller vers « un bâtiment sobre en énergie, mais aussi bien connecté à son territoire, soucieux de son empreinte carbone et de sa faible utilisation de ressources primaires dans tout son cycle de vie, anticipant ses mutations possibles comme sa déconstruction, se préoccupant de la santé et du confort de ses usagers, et économique en exploitation ».
- Créer un tronc commun entre les différents labels qui seront autant d'incitations fortes dans une logique d'incitation, d'amélioration progressive et de modulations régionales.
- Définir rapidement les tests et indicateurs de performance du bâtiment responsable.

Un certain nombre de défis sont résolus ou en passe de l'être dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments au cours de leur exploitation/utilisation. En effet, au cours de cette dernière décennie, l'émergence des bâtiments basse consommation a permis de réduire de près de 60 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'utilisation des bâtiments neufs⁴ en raison de la diminution des consommations énergétiques liées à cette utilisation.

En revanche, il est constaté dans le cadre d'une analyse de cycle de vie⁵ que la seule construction d'un bâtiment

3 – *Cap sur le futur « Bâtiment responsable »*, Rapport de recommandation #3 du groupe RBR 2020-2050, Septembre 2014

4 – Source : Sinto < [http://www.cleantechrepublic.com/2011/12/23/batiment-bas-carbone %C2 %A0-un-nouvel-enjeu-pour-les-maitres-d %E2 %80 %99ouvrages/](http://www.cleantechrepublic.com/2011/12/23/batiment-bas-carbone-%C2%A0-un-nouvel-enjeu-pour-les-maitres-d%E2%80%99ouvrages/) >

5 – "Les fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES) permettent par une étude détaillée (selon la norme NF P01-010) de réaliser un bilan environnemental des matériaux de construction pouvant être utilisés dans un projet. ». Source : < <http://fdes.fr> >

BBC consomme autant d'énergie que son utilisation pendant 30 ans. De plus, 60 à 80 % des émissions de gaz à effet de serre de la phase de construction sont attribuables aux matériaux de construction (voir Figure 1).

Par conséquent, le marché va devenir à court terme demandeur de systèmes constructifs à faible impact environnemental, notamment à la production et à l'installation, et à coûts maîtrisés.

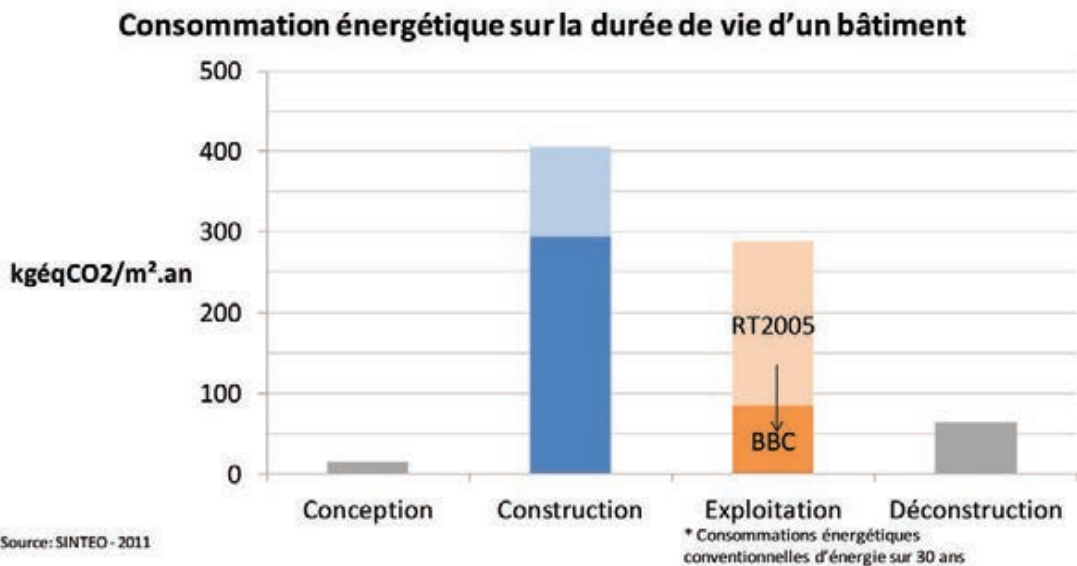


Figure 1 : Consommations énergétiques moyennes sur 30 ans. Source : Sinteo, 2011, repris par Erdyn

Liens avec d'autres technologies clés

Cette technologie est liée de manière significative aux systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment (40) car l'intégration d'énergies renouvelables au bâtiment est un point clé pour concevoir des bâtiments à haute qualité environnementale. De plus, le choix des systèmes constructifs influence la sélection des systèmes énergétiques. Cette technologie est également liée aux procédés relatifs à la chimie verte (8) qui peuvent permettre d'utiliser des matériaux à faible empreinte environnementale sur tout le cycle de vie. Elle est également liée aux systèmes de rénovation du bâti existant (38) dans la mesure où des techniques ou technologies peuvent être adaptées à la fois aux bâtiments neufs et aux bâtiments rénovés.

Les marchés

Les marchés de la construction sont principalement des marchés nationaux. De plus, différents labels ont été développés dans plusieurs pays et ceux-ci ne recouvrent pas exactement les mêmes définitions. Ainsi, il n'existe pas de données consolidées sur les logements à haute qualité environnementale en Europe ou

dans le monde. À titre d'exemple, la figure 2 compare différents pays européens.

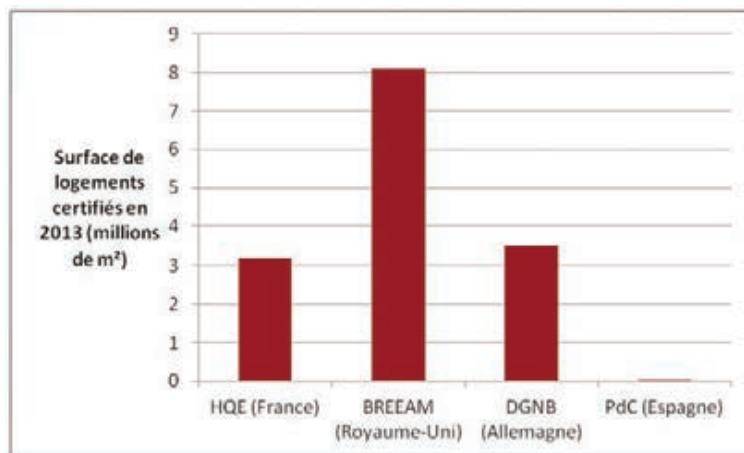


Figure 2 : Surfaces de logements à haute qualité environnementale (en millions de m²)⁶

D'après les données de l'observatoire BBC, en France, 138 251 logements et 1 057 621 m² de tertiaire ont été

6 – Sustainable Building Alliance (traitement Erdyn)

certifiés Bepos Effinergie, Effinergie+ ou BBC Effinergie en 2014. Cela représente encore une part conséquente des logements neufs : 37 % des 374 500 logements autorisés à la construction en 2014⁷.

Le marché concerne l'ensemble des bâtiments neufs mais il est probable qu'il se développera dans un premier temps dans les secteurs demandeurs de certification environnementale (le tertiaire et les logements collectifs) comme cela est déjà le cas aujourd'hui. En effet, en 2014, 116 892 logements collectifs ont été certifiés Bepos, Effinergie+ ou BBC Effinergie soit 85 % des logements certifiés.

D'après une étude de l'Ademe⁸, l'utilisation de produits biosourcés dans les bétons en France devrait augmenter de 64 % entre 2012 et 2020 et passer ainsi de 140 kt de biomasse employée pour les bétons en 2012 à 230 kt en 2020.

L'utilisation du bois dans la construction se développe. Ainsi, selon une étude d'Alcimed pour le PIPAME⁹, les maisons à ossature bois (actuellement plus de 75 % des constructions bois) représenteraient 17 000 à 36 000 unités par an en 2020. L'objectif de 20 % de part de marché des maisons individuelles d'ici 2020 paraît donc atteignable contre environ 12 % actuellement.

Les défis technologiques à relever

Les défis technologiques à résoudre pour les systèmes constructifs à haute qualité environnementale concernent principalement la production des matériaux de construction en eux-mêmes ou le développement de nouveaux matériaux. L'enjeu principal est la réduction de l'impact environnemental lié à leur production, leur transport et leur mise en œuvre. Les défis technologiques concernent principalement les matériaux biosourcés.

Les matériaux de construction biosourcés tels que les bétons végétaux (dans lesquels des fibres de bois, chanvre et lin principalement sont utilisées comme granulats) ont fait l'objet de recherches approfondies ces dernières années mais deux défis principaux subsistent. Tout d'abord, la compréhension du phénomène de prise du béton au sens chimique est à affiner et modéliser afin de pouvoir garantir un comportement optimal du matériau. En effet, cette phase est ajustée de manière empirique aujourd'hui ce qui engendre parfois des bétons avec une faible résistance mécanique¹⁰, limitant son utilisation à celle d'un matériau de remplissage, par exemple dans une ossature bois. Certains acteurs de la filière espèrent, avec des formulations spécifiques, obtenir à l'avenir un béton de chanvre porteur¹¹.

Par ailleurs, le fonctionnement de l'isolation thermique d'un béton végétal n'est pas identique à celui d'un béton classique car le béton végétal est poreux. Or ces phénomènes dynamiques (échanges d'eau, d'air, de chaleur avec l'extérieur) rendent la modélisation complexe. A contrario, les calculateurs actuels d'efficacité énergétique ne prennent en compte que la résistance thermique du mur, qui est relativement faible pour un béton végétal et qui ne reflète pas son efficacité d'isolation thermique. Ainsi il convient de continuer à progresser sur la modélisation des phénomènes dynamiques afin de pouvoir les prendre en compte dans le calcul de l'efficacité énergétique (des travaux sont déjà en cours pour prendre en compte le comportement hygrothermique des matériaux biosourcés dans le calcul de la performance thermique).

De plus, les matériaux de construction biosourcés sont aujourd'hui peu compétitifs au niveau du coût. L'étude réalisée pour le compte du MEDDE en 2012 relevait les écarts suivants¹² :

■ Sur l'isolation par l'intérieur, le coût de la laine de roche va de 7 à 10 € TTC /m², celui de la laine de verre

7 – D'après les données statistiques du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/logement-construction/rl-construction-logements.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=20087&cHash=fcd2dab2d9320fa914ffb1b4626794e1

8 – Ademe, 2015 : *Marchés actuels des produits biosourcés et évolutions à horizon 2020 et 2030*

9 – Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques, 2012 : *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020*

10 – Avec une masse volumique comprise entre 250 et 950 kg/m³, les bétons de chanvre sont beaucoup plus légers que le traditionnel béton de ciment C25/30 qui atteint les 2200 kg/m³. Ses performances mécaniques s'en ressentent. Source : Batirama.com

11 – Source : Batirama.com

12 – Étude réalisée par Nomadéis pour le compte du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, DGALN / PUCA, *Étude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits bio-sourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois)*, août 2012.

de 7 à 16 € TTC /m² quand celui de la ouate de cellulose va de 7 à 20 € TTC / m² et celui des panneaux de laine végétale de 20 à 40 € TTC /m².

■ Sur l'isolation par l'extérieur, les panneaux de polystyrène expansé coûtent de 14 à 29 € TTC /m², ceux de polystyrène extrudé de 25 à 35 € TTC /m² quand les panneaux rigides bois coûtent de 50 à 90 € TTC /m².

■ Pour les sols et soubassements, il est estimé que les bétons de chanvre ont un coût 10 à 15 % plus élevé que celui des matériaux conventionnels concurrents.

Notons toutefois qu'il existe déjà des cas de bâtiments utilisant fortement ce type de matériaux et avec un coût total du bâti équivalent à ce qu'il aurait été dans le cas d'utilisation de matériaux conventionnels grâce à des démarches d'ingénierie et d'optimisation performantes.

Parmi les matériaux traditionnels à faible impact environnemental, les travaux portent principalement sur le béton bas carbone. Il s'agit, lors de la production du ciment, de remplacer partiellement le clinker (dont la production est fortement consommatrice d'énergie) par des matériaux moins consommateurs d'énergie comme le laitier de haut fourneau, sous-produit de l'industrie métallurgique ou les cendres volantes issues de centrales thermiques. Pour le déploiement de ce type de produits, les enjeux se situent davantage au niveau de la structuration de la filière qu'au niveau technologique.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le déploiement commercial des systèmes constructifs à haute qualité environnementale représente le plus grand enjeu de développement de ces systèmes. Trois axes d'amélioration majeurs émergent aujourd'hui : la structuration et l'industrialisation des nouvelles filières, la réduction des coûts de production et la communication autour de ces systèmes et de leurs avantages à toute la chaîne de valeur.

Pour le développement des matériaux de construction biosourcés, la structuration des filières est clé. Aujourd'hui cette structuration est en cours. Plus que la garantie de volumes disponibles tout au long de l'année (qui est maintenant assurée pour le bois, les fibres de lin et de chanvre par exemple), l'objectif est désormais de fournir une qualité constante au cours du temps et sur tout le territoire. En effet, les productions agricoles sont sujettes à des variations d'une

région et d'une année à l'autre. Or pour une utilisation industrielle, la variabilité des produits doit être réduite. Pour le bois, cela nécessite aussi une concertation sur les essences demandées à long terme sur le marché. Ainsi, les filières poursuivent leur structuration dans ce sens et mettent notamment à contribution les semenciers, les producteurs et les négociants pour développer des variétés plus fiables, uniformiser les pratiques de culture et organiser un stockage pluriannuel.

La réduction des coûts de revient des matériaux de construction biosourcés est un enjeu bien connu dont la réalisation passera aussi par la structuration de la filière et son industrialisation.

Pour les matériaux traditionnels à faible impact environnemental, la structuration de la filière (qualité, logistique et réduction des coûts d'approvisionnement) est là aussi la principale problématique qui en permettra la diffusion commerciale. Dans le cas du béton bas carbone, il s'agit même d'une problématique bien supérieure aux freins technologiques.

Enfin, la problématique de diffusion des nouveaux produits dans le secteur du bâtiment est clé. En effet, le secteur étant très atomisé (93 % des entreprises ont moins de 10 salariés¹³), cela demande du temps et de la formation pour mobiliser tous les acteurs du secteur sur l'ensemble de la chaîne de valeur : production des matériaux et des sous-systèmes constituant le bâtiment, conception du bâtiment, exploitation/utilisation et fin de vie. Acquérir des références est également nécessaire, afin de convaincre la maîtrise d'ouvrage de la crédibilité de ces matériaux et des entreprises qui les portent (ce sont souvent des TPE ou petites PME).

Les enjeux réglementaires, sanitaires et environnementaux

L'application de la réglementation thermique 2012 (RT2012) constitue une avancée inégalée en Europe dans la maîtrise des consommations énergétiques des bâtiments neufs. La RT2012 a en effet conduit à diviser par 2 à 3 les consommations d'énergie réglementées grâce à la généralisation des bâtiments neufs basse consommation depuis le 1^{er} janvier 2013.

13 – COSEI, 2011 : *Soutenir la compétitivité de la filière française du bâtiment à faible impact environnemental*

Cette réglementation s'inscrit dans la directive de performance énergétique et notamment à son article 9 qui impose que les États membres généralisent à horizon 2020, dans la construction neuve, les bâtiments à énergie quasi-nulle et ayant recours de manière significative aux énergies renouvelables.

Le contexte législatif national actuel introduit quant à lui l'objectif de généraliser les bâtiments à énergie positive dans la construction neuve pour 2020. En outre, la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte a modifié l'article L.111-9 du code de la construction et de l'habitation afin d'avancer à 2018 la définition d'une méthode de calcul des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie d'une construction neuve. Ainsi, les notions de bâtiment à énergie positive et de haute performance environnementale devront être définies en cohérence avec le contexte européen et national.

À ce titre, les travaux de préparation de la future réglementation énergétique et environnementale se consacrent à l'élaboration collaborative, avec les professionnels, d'un référentiel volontaire pour l'affichage des performances du bâtiment à énergie positive et à haute performance environnementale pour la fin d'année 2015. Aussi, des groupes de travail ont-ils débuté au mois d'avril 2015.

La France a mis en œuvre une réglementation (Décret n° 2013-1264 du 23 décembre 2013 relatif à la déclaration environnementale de certains produits de construction destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment) relative à la déclaration environnementale des produits de construction. Cette réglementation prévoit que, dès lors qu'un fabricant souhaite communiquer sur un aspect environnemental de son

produit, il doit renseigner et communiquer aux autorités publiques la déclaration environnementale de ce produit. Cette déclaration environnementale est réalisée conformément à la norme NF EN 15804 et son complément national. Le dépôt des déclarations se fait sur une base de données réglementaire mise à disposition par les autorités publiques. L'objectif est de disposer de données robustes, cohérentes entre elles et fiabilisées avec une vérification par une tierce partie indépendante dès juillet 2017 pour les produits et équipements de construction.

Plusieurs labels ou certifications en lien avec les performances environnementales du bâtiment existent ou sont en cours d'élaboration. La certification NF HQE (Haute Qualité Environnementale) reprend les différentes dimensions de la démarche HQE. La certification NF HPE (Haute Performance Énergétique) reprend les critères de la certification HQE en lien avec l'efficacité énergétique.

Le label Bâtiment biosourcé vise à mettre en avant les bâtiments qui intègrent une part importante de matériaux biosourcés. Actuellement, l'Association bâtiment bas carbone (BBCA) travaille également à élaborer une méthodologie de labellisation des bâtiments utilisant des matériaux de construction bas carbone.

De manière générale, tout label ne peut être délivré que si le bâtiment a déjà fait l'objet d'une certification.

Pour l'export, des dénominations similaires à la HQE existent en Europe et aux États-Unis : BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) au Royaume-Uni, DGNB (German Green Building Council) en Allemagne, LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) aux États-Unis et PdC (Perfil de Calidad) en Espagne.



Analyse AFOM

ATOUTS

Approches collectives de la performance environnementale portée par l'association HQE

Certifications environnementales qui poussent le marché

Offre industrielle variée et répartie sur le territoire ce qui est une force en matière d'environnement

FAIBLESSES

Certifications environnementales françaises pas assez déployées à l'international

L'industrialisation peine à se réaliser en étant seulement portée par des entreprises de petite taille

OPPORTUNITÉS

Mise en place d'une étiquette de performance environnementale probable par les pouvoirs publics

MENACES

Mise en place de nouveaux systèmes constructifs à haute qualité environnementale perçue comme complexe par certains acteurs

Facteurs clés de succès et recommandations

Au vu des différentes initiatives qui se développent sur la haute qualité environnementale, le principal facteur clé de succès est la convergence vers un nombre restreint de normes et labels basés sur des critères de performances pertinents et fiables. La DHUP a lancé une telle démarche avec les professionnels pour la mise en place d'un référentiel d'évaluation de la performance environnementale du bâtiment neuf. Celui-ci permettra une dynamique plus forte sur des sujets bien ciblés et une meilleure lisibilité de la Haute Qualité Environnementale par tous les acteurs de la chaîne de valeur, des producteurs de matières premières aux utilisateurs finaux.

La poursuite de la structuration des nouvelles filières des matériaux de construction ainsi que

l'industrialisation est également clé pour le déploiement de ces matériaux à grande échelle. L'intervention de groupes industriels déjà établis sur d'autres matériaux pourrait accélérer cette démarche.

Enfin, la promotion de la Haute Qualité Environnementale, sous forme de formation, de campagnes de sensibilisation et d'incitations fiscales permettra d'accélérer le déploiement de ce type de bâtiments et leur appropriation par les différents acteurs de la chaîne de valeur. L'exemplarité du public en favorisant l'utilisation de ces matériaux dans le bâti public permettrait d'accélérer l'industrialisation et la crédibilité de ces filières.

Acteurs clés

Fabricants de matériaux de construction et de matières premières : Saint-Gobain (placoplatre, verre), Lafarge (béton), Vicat (béton), Imerys (terre cuite), Bouyer Leroux (terre cuite), Chanvribloc (chanvre), Terre de Lin (lin), Les Chanvrières de l'Aube (chanvre), BCB Tradical (chaux), Chaux & Enduits de St Astier (chaux), Alkern (bloc béton)

Industriels des systèmes constructifs : Cobs (bois), Novhisol (système constructif à ossature en béton armé et béton de fibres végétales), Cuiller Frères

Maître d'œuvre : Bouygues Construction, Vinci, Eiffage, SPIE

Centres de recherche et centres techniques : CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), Labex

MMCD (Modélisation et expérimentation multi-échelle des matériaux pour la construction Durable), IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), CTMNC (Centre technique des matériaux naturels de construction), Polytech Clermont Ferrand, Laboratoire de génie civil et génie mécanique (Université de Rennes 1/ INSA Rennes), FRD CODEM le Matlab

Associations : association HQE, AIMCC (Association des industriels des produits de construction), pôle éco-conception, Qualibat, Construire en chanvre

Organismes certificateurs : Cequami, Certivéa, Cerqual

Pôle de compétitivité : Fibres Energievie, Xylofutur, IAR, Matikem, pôle Innovations Constructives, Advancity

Autres structures de soutien : Ademe, Prebat

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

40

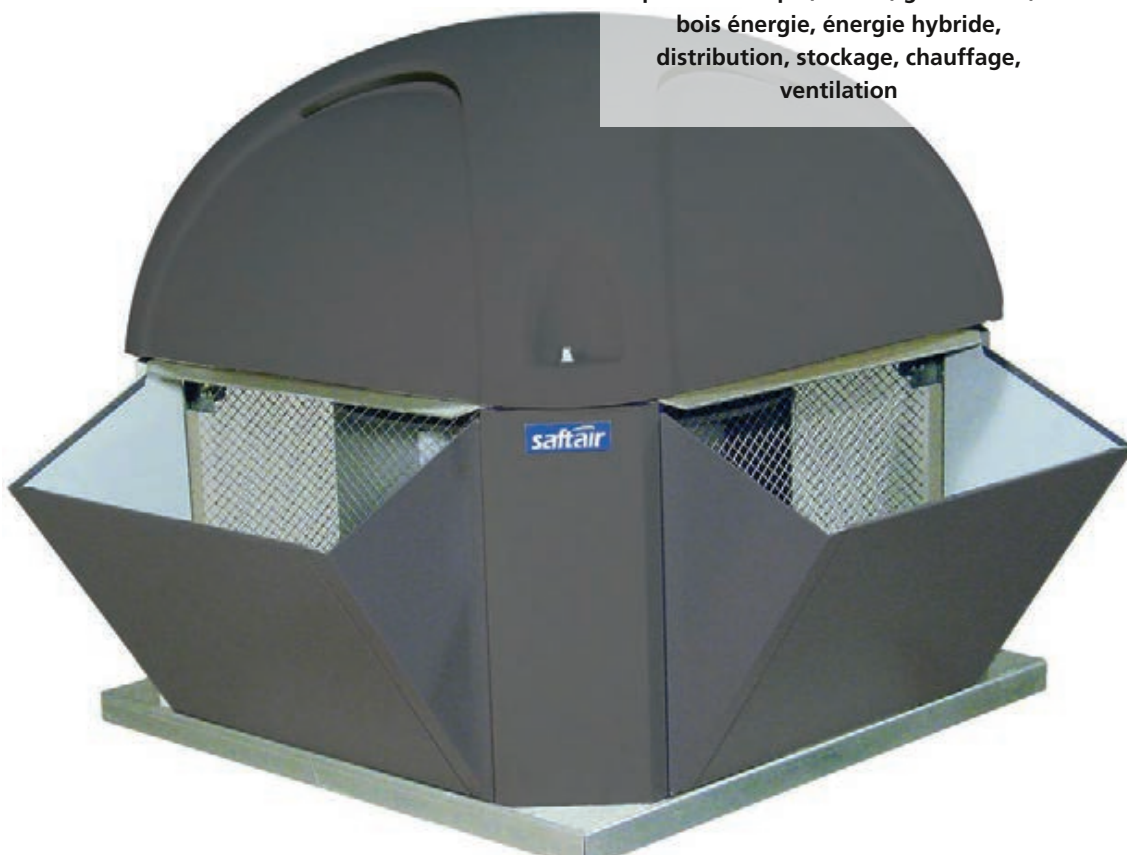
Systemes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, Numérique
Environnement, HABITAT , Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► Nouvelle technologie clé

MOTS CLÉS

Énergie, solaire thermique,
photovoltaïque, éolien, géothermie,
bois énergie, énergie hybride,
distribution, stockage, chauffage,
ventilation



Définition et périmètre

Les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment regroupent les technologies permettant l'intégration des systèmes de production, de distribution, de gestion et de stockage de l'énergie dans un même bâtiment. Ils comprennent l'intégration des technologies hybrides qui est l'intégration des énergies renouvelables aux énergies conventionnelles (fioul, électricité, gaz). Les sources d'énergies utilisées dans le bâtiment sont des énergies non renouvelables (gaz, fioul, électricité non renouvelable) et des énergies renouvelables (solaire thermique, photovoltaïque, géothermie, aérothermie, réseau de chaleur et bois énergie). On notera que l'éolien intégré au bâtiment est très peu diffusé en France et dans le monde.

Ils peuvent également concerner la distribution de chaleur via le vecteur air, les systèmes associant plusieurs fonctions (chauffage, ventilation, production d'eau chaude) et la récupération de la chaleur fatale sur l'air extrait, les eaux grises. La gestion de ces systèmes passe par l'utilisation de capteurs intelligents liés au domaine de la domotique.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La transition énergétique pousse au développement et à la diffusion des systèmes énergétiques innovants notamment en matière de production de chaleur et

de froid via des sources hybrides associant les énergies renouvelables, le gaz et l'électricité, de production d'électricité intégrée au bâtiment (photovoltaïque, cogénération) et de stockage d'énergie dans la structure du bâtiment, dans l'eau chaude et la gestion intelligente de ce stockage. L'intégration de l'ensemble de ces éléments et leur pilotage intelligent selon différents critères (coût, énergie, CO₂) en fonction des besoins du bâtiment et de ses occupants et en interaction avec les réseaux constitue un enjeu majeur. Cette technologie est stratégique et devrait être à maturité dans 3 ans. De plus, l'intégration des énergies nouvelles en complément des énergies conventionnelles reste une technologie à maîtriser et à développer. L'intégration de ces énergies permettra de relever des enjeux réglementaires tels que le nZEB (nearly zero emission building) et le BEPOS (bâtiment à énergie positive) (voir ci-dessous).

Cette technologie est donc stratégique pour les acteurs du logement, et le développement des technologies concernées est attendu pour 2020, en concordance avec le calendrier réglementaire.

Les entreprises françaises restent pour l'instant dans la moyenne sur ces technologies. Les acteurs académiques sont par contre dans le peloton de tête au niveau mondial, sans pour autant en garder le leadership.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment sont :

- 1 Matériaux avancés et actifs
- 2 Capteurs
- 3 Valorisation et intelligence des données massives
- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique
- 5 Internet des objets
- 6 Infrastructures de 5^{ème} génération
- 7 Systèmes embarqués et distribués, sécurisés et sûrs

Les technologies influencées par les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment sont :

- 3 Valorisation et intelligence des données massives
- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique
- 6 Infrastructures de 5^{ème} génération
- 38 Systèmes de rénovation du bâti existant
- 39 Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf

Les technologies clés qui influencent les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment sont :

14	Technologies immersives
38	Systèmes de rénovation du bâti existant
39	Systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf

Cette technologie est fortement liée à la modélisation, simulation et ingénierie numérique (4). La conception avancée permettra de mieux disposer les éléments afin d'optimiser la gestion, distribution de l'énergie. Elle est également liée aux capteurs (2) qui permettent de mieux gérer les consommations d'énergies dans le bâtiment. Elle concerne aussi les systèmes constructifs à haute qualité environnementale pour le neuf (39).

Les marchés

Le marché des énergies renouvelables est réparti entre les marchés des énergies solaire, éolienne, géothermique, hydroélectrique et le bois énergie. Les énergies renouvelables concernent aussi bien les bâtiments tertiaires que résidentiels. La directive européenne 2009/28/CE fixe pour la France un objectif de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie pour 2020. En 2012, la France atteignait 13,7 %.

En 2013, le marché mondial cumulé des parcs solaires photovoltaïques est estimé à près de 140 GW, porté en grande partie par la Chine qui atteignait à elle seule 13 GW. Selon le Commissariat général au développement durable (CGDD), le parc solaire photovoltaïque en France atteignait une puissance installée de 5631 MW fin 2014. Cette puissance représente une croissance de 20 % par rapport à 2013. Les projets photovoltaïques en cours fin 2014 ayant une convention de raccordement signée représentent 850 MW¹, soit 4,7 MWc cumulé en France. L'habitat représente une petite partie du raccordement photovoltaïque : les projets pour le résidentiel (< 9 kW) représentent au total 897 MW, 20 % de la puissance raccordée cumulée jusqu'en fin 2014². Ce sont surtout les projets supérieurs à 1 MW qui boostent la production d'énergie

1 – Commissariat Général au développement durable

2 – Observatoire Énergie Solaire Photovoltaïque

Les technologies influencées par les systèmes énergétiques intégrés à l'échelle du bâtiment sont :

photovoltaïque en France depuis 2012. Au contraire, le marché du photovoltaïque résidentiel est stable, avec environ 120 MWc par an.

La production de la filière solaire thermique s'élève à 133 ktep en France en 2012. Jusqu'à 2009, la production a fortement progressé puis la progression a ralenti après 2010. L'objectif fixé pour 2020 vise 927 ktep de consommation d'énergie solaire thermique³.

L'intégration des énergies renouvelables concerne aussi bien les bâtiments neufs que les bâtiments en rénovation. En 2012, on comptait 33,4 millions de logements dont 27,8 millions de résidences principales⁴. Près de 30 millions de m² de logements et 27 millions de m² de bâtiments tertiaires ont été construits en 2013⁵. Le bâtiment représente 40 % de l'énergie totale consommée en Europe. En équipant 30 % du parc immobilier de panneaux photovoltaïques en France, le potentiel de production serait estimé à 45 TWh, ce qui correspond à 10 % de la consommation électrique française⁶. Ces opportunités concernent aussi bien les constructions neuves que les rénovations.

En 2013, 501 réseaux de chaleur étaient implantés dans 350 villes en France⁷. Ils permettent un accès plus facile à des énergies renouvelables comme la biomasse (bois-énergie) et la géothermie aux bâtiments publics et privés. Les énergies renouvelables et de récupération représentaient 40 % du mix énergétique des réseaux de chaleur en France la même année, chiffre qui a augmenté de plus de 50 % en neuf ans.

3 – Commissariat Général au développement durable

4 – Ademe

5 – Fédération Française du Bâtiment (FFB)

6 – Les États Généraux du Solaire Photovoltaïque, « Solaire Photovoltaïque : quelles réalités pour 2020 ? », Oct 2011

7 – Fédération des services énergie environnement (FEDENE) : www.fedene.fr

Les défis technologiques à relever

La progression de l'intégration des technologies hybrides peut être ralentie par des freins technologiques.

La filière biomasse, quant à elle, présente des incertitudes quant à son développement. La mobilisation reste insuffisante, due en partie à la fiscalité forestière qui incite peu à l'exploitation et la replantation. Dans certaines régions, l'offre est insuffisante à cause de la sous-exploitation de la forêt. La disponibilité de cette ressource constitue également un frein. La pluviométrie exceptionnelle depuis l'hiver 2012-2013 est très défavorable à la mobilisation des bois rendant l'exploitation des parcelles difficiles⁸. La difficulté à anticiper les projets est également un frein au développement de la biomasse. De nouveaux projets de grande ampleur pourraient facilement rendre le nombre d'équipement insuffisant dans les régions. En parallèle, l'anticipation d'une demande qui tarde à arriver dans les régions a conduit à l'acquisition de certains équipements (broyeurs) qui se retrouvent finalement en sous-utilisation⁹. Cette surcapacité, co-financée par les régions et les entreprises, est à l'origine de coûts de transformation plus élevés ce qui rend l'amortissement difficile pour les entreprises.

Dans la filière photovoltaïque, les problèmes de sécurité et d'étanchéité ne sont pas encore résolus. Par exemple, le marché du BIPV (Building Integrated Photovoltaic), des panneaux photovoltaïques intégrés aux bâtiments en tant que matériaux de construction, est encore peu connu.

Sur les technologies d'intégration en elles-mêmes, les principales difficultés sont liées à l'installation et la maintenance des installations : la part de plus en plus forte de l'électronique nécessite de former spécifiquement les opérateurs.

Le stockage d'énergie électrique est aussi un des enjeux dans le cadre d'autoconsommation. Les technologies de type batterie, volant à inertie ou encore thermochimique existent déjà mais ne sont pas totalement satisfaisantes en termes de rendement et de rapport coût/durée de vie. Les technologies issues de la mobilité

8 – Fédération des services énergie environnement (FEDENE), « Biomasse enjeux et chiffres clés », Avril 2014

9 – Comité Interprofessionnel du Bois Énergie (CIBE)

(batteries lithium) sont des relais possibles, avec toutefois des critères différents par exemple autour de la capacité ou de la fiabilité des technologies.

En lien avec les technologies clés de « modélisation, simulation et ingénierie numérique », les défis sont liés aussi à une évolution des pratiques de conception, basées sur une prise en compte de l'ensemble du bâtiment mais aussi de son intégration dans son environnement afin de gérer les intermittences possibles d'énergie tout en conservant la frugalité énergétique du bâtiment. Enfin, le raccord à l'échelle de l'îlot, notamment en vue du développement des smart grids, représente lui aussi un défi sur la conception du bâtiment, et la surveillance des sources d'énergie et la communication entre elles.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'accessibilité et la rentabilité des systèmes hybrides sont des défis commerciaux. Les coûts d'investissement pour les énergies éolienne et photovoltaïque sont les plus importants même s'ils sont en baisse. Les panneaux photovoltaïques sont majoritairement importés, en particulier de Chine. Pour les acteurs français, le défi reste donc dans la proposition de solutions clés en main et non sur les panneaux photovoltaïques en eux-mêmes. Cependant, la diminution du prix des modules photovoltaïques a provoqué une baisse importante des coûts d'investissement et d'exploitation depuis 2010¹⁰. En effet, le prix des modules représente près de la moitié des coûts d'investissements.

De manière générale, les fortes fluctuations des cours des hydrocarbures, une baisse de longue durée du secteur de la construction en France¹¹ et un coût encore élevé des équipements ENR nuit à leur diffusion (le marché des chaudières à condensation utilisant des hydrocarbures étant lui en croissance sur cette même période)¹² :

■ Chaudières bois : 14 500 unités vendues en 2014 (-37 % par rapport à 2013), le marché est en

10 – Rapport CRE (Commission de Régulation de l'Énergie) « Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine », Avril 2014

11 – Depuis 2008, le secteur de la construction a connu un recul de 20,4 % de son activité (-1,6 % en 2015). Les professionnels du secteur s'attendent néanmoins à un redémarrage en 2016 avec une croissance de +0,7 %. Source : Euler Hermes.

12 – Source des données mentionnées ci-dessous : UNICLIMA ; *Bilan 2014 et perspectives 2015 du génie climatique* ; dossier de presse présenté le 10 février 2015.

dents de scie depuis 2005 où il avait atteint son maximum (2014 représente environ la moitié des unités vendues en 2005).

■ Le marché du solaire thermique continue en 2014 la baisse engagée depuis 2008 avec une nouvelle chute de 21 % des surfaces installées :

— Baisse de 9 % du marché des chauffe-eau solaires individuels (CESI) qui s'établit à 18600 unités en 2014. Grâce à une optimisation technico-économique des produits, le segment des CESI baisse moins que les autres. On pourra notamment citer le segment des colonnes solaires (ou chaudières compactes associées avec un CESI) qui représente plus de 25 % du marché des CESI et ne baisse que de 7 %.

— Les systèmes solaires combinés (SSC) qui alimentent la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage sont toujours conçus en complémentarité avec une chaudière classique. Ce marché poursuit sa baisse (-36 % par rapport à 2013) et avec 700 unités vendues en 2014 il peut aujourd'hui être considéré comme une niche en France, aussi bien sur le neuf que sur la rénovation. A contrario, les SSC sont une technologie de référence sur le marché allemand.

— Les livraisons de capteurs destinés aux immeubles collectifs sont, pour la deuxième année consécutive, en baisse (-22 %) avec une surface installée de 75 500 m².

■ Le marché des pompes à chaleur sur vecteur eau continue à baisser (-19 %) en 2014 et s'établit à 3 249 unités. À noter qu'en Allemagne, ce marché a également baissé de 13,4 % en 2014. Si Uniclimate ne donne pas de statistiques sur le marché des pompes à chaleur géothermique, l'AFPAC¹³ estime que la baisse en 2015 par rapport à 2014 est de 15 % (-10 % sur les systèmes eau glycolée/eau et eau/eau).

L'incitation des pays pour encourager la production d'énergie par les particuliers et professionnels se traduit par une réduction des impôts et des subventions aux équipements, le but étant de réduire les émissions en CO₂. En France, en 2015 :

■ Taux de 30 % par dépense engagée à l'exclusion de la main d'œuvre sans condition de ressources ni obligation de réalisation d'un bouquet de travaux

■ Calcul sur le montant TTC des dépenses, déduction faite des autres aides

■ Plafond des dépenses éligibles fixé à 8 000€ par personne et 16 000€ pour un couple

Les variations des taux de ce type de crédit d'impôt ont un fort impact sur la compétitivité de l'offre et sur la rentabilité des modifications énergétiques d'un bâtiment. Par ailleurs, le manque de visibilité sur les tarifs de rachat de l'électricité ou du biogaz (qui concerne toutefois plus le tertiaire ou les installations agricoles que l'habitat) peuvent freiner les investissements potentiels dans les technologies de production.

L'utilisation des énergies renouvelables dépend aussi des ressources naturelles disponibles dans chaque pays, voire région. Les pays qui disposent d'un fort ensoleillement toute l'année seront plus à même de bénéficier de l'énergie solaire.

Les enjeux réglementaires

Les objectifs de la transition énergétique prévoient une division par 4 de la consommation énergétique de l'ensemble du parc de bâtiments en 2050 par rapport à 2010 ainsi que 500 000 logements rénovés par an à partir de 2017.



La RT 2012 en application depuis le 1^{er} janvier 2013 pour tous les bâtiments neufs a pour objectif le niveau « bâtiment basse consommation » c'est-à-dire 50 kWhEP/m²/an.

Par ailleurs, le développement du BEPOS (bâtiment à énergie positive) a été mis au cœur de la loi sur la transition énergétique, en particulier pour la construction

13 – Source : AFPAC ; lettre d'information n°23 ; juin 2015.

des futurs bâtiments publics. La prochaine réglementation environnementale et énergétique de 2020 visera encore davantage le développement des énergies renouvelables en accord avec la directive européenne EPBD 2010/31/EU rendant obligatoire le niveau de performance Nearly Zero Energy Building (nZEB) pour toutes les constructions neuves.

Le nZEB est un bâtiment à faible consommation énergétique, comme l'illustre le schéma ci-dessous, dont les équipements seront très performants et qui devrait avoir un recours significatif aux énergies renouvelables. Le BEPOS quant à lui pourra, en plus du nZEB, viser autant que possible une production d'énergie renouvelable supérieure à sa consommation d'énergie primaire.

La réponse technique pour l'atteinte du nZEB et du BEPOS pourra se faire par :

- une conception bioclimatique renforcée, profitant au maximum des atouts du climat local,
- des matériaux d'enveloppe à haute performance énergétique et environnementale,
- des systèmes énergétiques de chauffage, d'eau chaude et d'éclairage à haute efficacité,

- un recours limité aux énergies non renouvelables ou une part significative de recours aux énergies renouvelables.

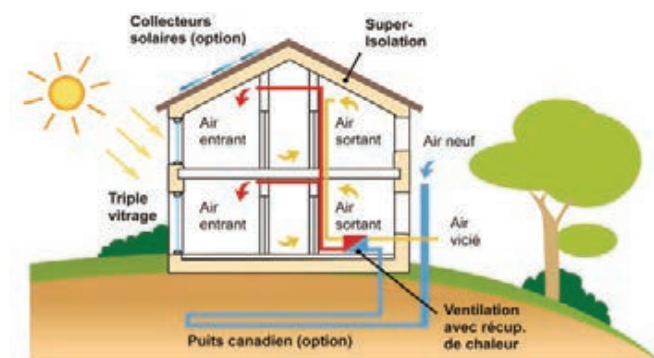


Figure 1 : Schéma représentant une maison passive
(source : Sénova)

Le stockage d'énergie électrique est aussi un enjeu pour la filière qui est fortement lié à l'aspect réglementaire. En France, il est plus rentable de revendre l'électricité, tandis qu'en Allemagne l'autoconsommation est plus avantageuse fiscalement. Les conceptions de système de stockage électrique sont donc très dépendantes des réglementations locales.

Analyse AFOM

ATOUS

Tissu industriel dense avec de nombreuses entreprises de taille intermédiaire (ETI).

Mise en place des certifications soutenue par les pouvoirs publics, avec une visibilité croissante.

FAIBLESSES

Faible coût de l'électricité en France et systèmes très réglementés.

OPPORTUNITÉS

Evolutions réglementaires notamment vers les BEPOS et les règlements européens. Notion d'éco-conception.

MENACES

Acteurs internationaux puissants à la fois sur les équipements et sur leur pilotage : acteurs traditionnels (ex : Siemens) ou nouveaux (ex : Google avec Nest).

Pérennité des aides assurant la rentabilité des investissements.

Facteurs clés de succès et recommandations

De forts investissements sont nécessaires pour lever les verrous technologiques et commerciaux. Il faudra adapter les dispositifs de soutien à l'innovation par le biais notamment d'appels à projets spécifiques.

La mise en place de méthodes de calculs, de labels et de standards tels l'étiquette environnementale des bâtiments neufs et le référentiel BEPOS pourra favoriser les réponses aux enjeux évoqués et garantir la performance.

L'intégration des technologies hybrides sera facilitée par d'autres technologies clés telles que les

capteurs et la conception avancée (modélisation, simulation et ingénierie numérique).

Encourager la recherche par le biais d'appels à projets spécifiques et de démonstrateurs dédiés, équipés de capteurs, permettrait de répondre à l'utilisation simultanée de plusieurs sources d'énergies renouvelables. Un soutien de la demande par des acteurs politiques, notamment grâce aux crédits d'impôt et subventions favoriserait l'intégration des énergies renouvelables aux énergies conventionnelles.

Acteurs clés :

Fabricants d'équipement de chauffage, climatisation, ventilation : CIAT, Aldes, CHAPPEE, Finimetal, Saftair Ventilation, Unelvent

Spécialistes du contrôle commande : Schneider Electric, Delta Dore, Legrand, CITELE, Somfy

Fournisseurs de capteurs intelligents : Factory Systèmes, SICK

Industriels de systèmes photovoltaïques : Tenesol, Fonroche Energie, Sunpartner, Solabios, Exosun

Fabricants de systèmes solaires thermiques : Clipsol (groupe Engie), Giordano Industries

Fabricants de pompes à chaleur : Aldes, Atlantic, CIAT, Sanden, Sofath

Fabricants de chaudières bois : Ecometis, Euroclima, Novotek Industry, Perge

Réseaux de chaleurs : Barriquand Technologies, Inpal Industries

Bureaux d'études certifiés dans le domaine de la thermique : Bastide Bondoux, Beneficience (groupe Elithis), ABM Énergie Conseil, Prelem

Centres techniques et instituts : CETIAT, CSTB, INES

Fournisseurs d'énergie : EDF, GDF, GRDF

Distributeurs d'électricité : ERDF, RTE

Pôles de compétitivité : TENERDIS, S2E2, DERBI, Capenergies, Fibres Energivie, Advancity

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

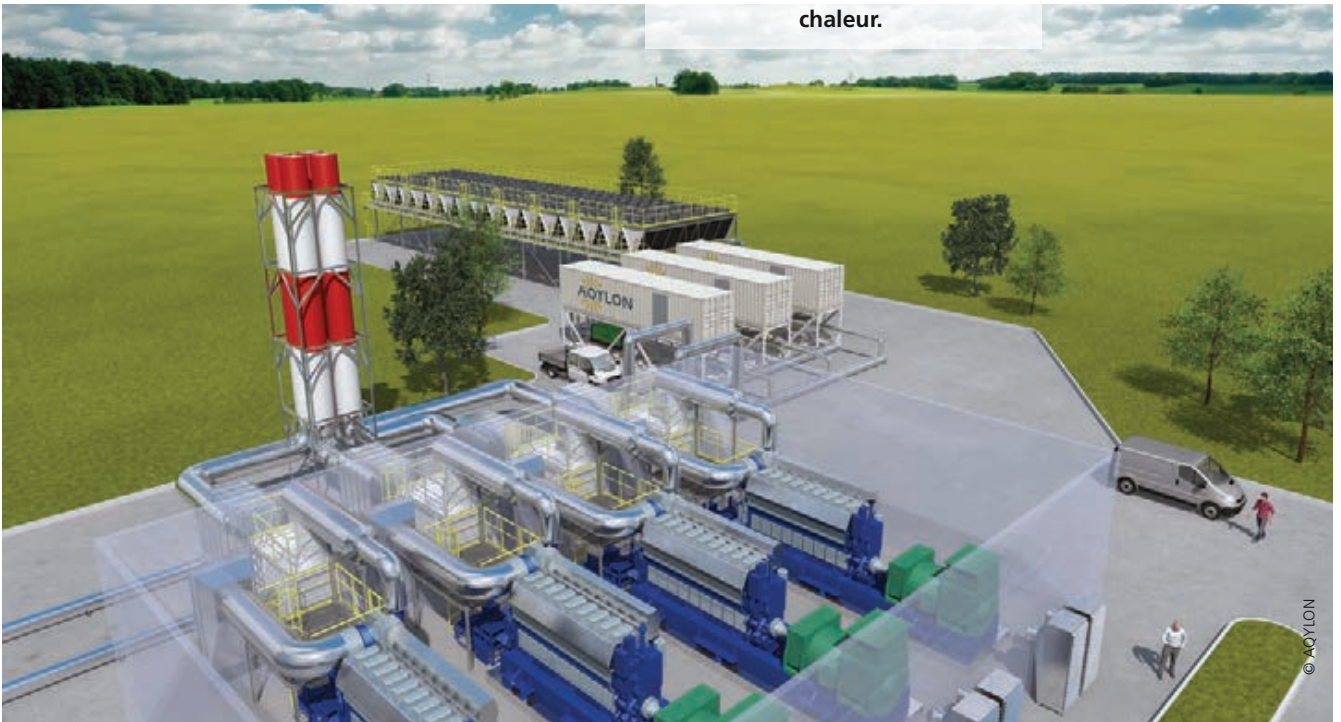
41 Technologies de récupération de chaleur à basse température

Loisirs & culture
ÉNERGIE, Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Pompe à chaleur ; chaleur fatale ; valorisation de la chaleur.



Définition et périmètre

La chaleur dite « à basse température » désigne les sources d'énergie thermique dont la température est insuffisante pour qu'elle puisse être directement valorisée pour un usage industriel interne, ou convertie en électricité par les moyens conventionnels. Il s'agit, par exemple, de la chaleur issue d'un procédé de production dont ce n'est pas le premier objet et qui n'est pas réemployable (chaleur fatale) : fumées de fours, eaux de refroidissement, etc. En plus de ces sources principalement industrielles, d'autres sont associées aux énergies renouvelables : énergie solaire, valorisation énergétique de la biomasse (combustion et gazéification) et géothermie basse énergie. Le premier enjeu

est de capter et éventuellement de transporter cette chaleur, puis, dans un second temps, de la transformer en une forme d'énergie plus facilement valorisable : chaleur à plus haute température, froid ou électricité.

Les gisements de chaleurs résiduelles (ou chaleurs fatales), issues par exemple des procédés industriels, sont souvent perdus car non directement utilisables.

Il s'agit par exemple de sources de chaleur à des températures inférieures à 130°C provenant des purges de chaudières, des condensats de vapeur, des vapeurs de procédé, etc. Dans le cas du solaire thermique et de la géothermie, il s'agit principalement de chaleur à des températures inférieures à 200°C.



Bilan thermique d'un four industriel (source : ADEME)

La chaleur peut être disponible dans un fluide sous forme liquide ou, le plus souvent, gazeuse (gaz chauds). Différents principes physiques peuvent être mis en œuvre en fonction des caractéristiques de la source disponible et de la forme d'énergie que l'on souhaite produire (chaleur, froid, électricité).

Cycle Rankine Les cycles Rankine à fluide organique (ORC : Organic Rankine Cycles) utilisent un fluide organique comme fluide de travail, principalement des fluides également utilisés comme réfrigérants : CFC, HFC, isopentane, propane, ammoniac, etc. Ces cycles peuvent fonctionner à 70-80°C mais aussi à 400°C. Ils sont bien adaptés à la production d'électricité (via une turbine) à partir d'une source de chaleur à basse température autour de 150-200°C. Leur rendement est de l'ordre de 10 à 20 %.

Cycle Kalina Ce cycle utilise un mélange non azéotrope de fluides fournissant du travail dans une turbine. Le mélange est souvent de type eau/ammoniac mais il existe des variantes utilisant des composés organiques. Dans un évaporateur, la source de chaleur chauffe le mélange eau/ammoniac initial qui se vaporise partiel-

lement et produit une vapeur à forte concentration en ammoniac et un liquide pauvre en ammoniac. Le flux gazeux entraîne une turbine de détente avant d'être remélangé avec le liquide puis refroidi jusqu'à condensation totale. Le mélange est ensuite pompé pour un nouveau cycle. Une des principales spécificités de ce cycle est l'évolution de la composition du fluide de travail en fonction de la température ce qui permet de mieux valoriser les sources à température variable. Théoriquement plus efficace que le cycle ORC, il est néanmoins plus complexe et plus coûteux en investissement.

Dans le cas des cycles pour la production d'électricité, il est possible d'ajouter une valorisation supplémentaire en récupérant de la chaleur au niveau des condenseurs (plus froide que celle entrée dans le cycle) pour alimenter par exemple un réseau de chaleur.

Thermoélectricité (effet Seebeck) La technologie thermoélectrique consiste à directement convertir la chaleur en électricité dans une cellule de matériaux semi-conducteurs en utilisant une source chaude et une source froide. Le système est composé de deux

éléments semi-conducteurs de type p et de type n. Sous l'effet du différentiel de température, une force électromotrice thermique est générée, d'où un flux de courant entre les éléments semi-conducteurs. Le poids, la taille des systèmes thermoélectriques et l'absence de pièces mécaniques en mouvement sont leurs principaux atouts. Cette technologie, adaptée aux faibles puissances, est dans l'état actuel extrêmement coûteuse ; de plus, elle impose l'utilisation de métaux rares.

Cycles à absorption Ces cycles sont utilisés dans des équipements de type pompe à chaleur. Le rehaussement de température est compris entre 20 et 50°C pour une limite de la température maximale de la chaleur récupérée à 150°C en raison des phénomènes de corrosion induits par les fluides employés (LiBr/eau ou eau/ammoniac). Les cycles utilisés peuvent être simples ou double effet. Les machines à absorption sont également fréquemment utilisées pour produire du froid à partir d'une source de chaleur.

Cycles hybrides La terminologie « hybride » fait référence à l'association entre un cycle à absorption et un autre cycle. Les deux cas de figure envisageables sont l'absorption et la thermocompression, et l'absorption et la compression mécanique. Le second cas de figure est destiné à valoriser une chaleur résiduelle à 50 °C. Il s'agit d'un cycle associant absorption et compression, avec un fluide eau/ammoniac ; il peut produire de l'eau chaude à 95°C, ainsi que de l'eau glacée à 5°C.

Machines thermoacoustiques Les pompes à chaleur thermoacoustiques utilisent la propriété des ondes sonores de pouvoir créer une différence de température, et vice-versa. Le système est composé d'un régénérateur placé à une de ses extrémités dont le rôle est de prélever la chaleur au niveau de la source chaude pour la convertir en énergie acoustique. A l'autre extrémité,

le phénomène inverse est utilisé pour convertir l'onde acoustique en chaleur. Le transfert de l'onde est assuré par un résonateur reliant les deux extrémités. Ce système utilise un gaz comme fluide de travail et permet de valoriser de la chaleur comprise entre 50 et 100°C.

Les **moteurs à combustion externe** (de type Stirling ou Ericsson) permettent de produire de l'énergie mécanique à partir de deux sources de température (une chaude et une froide) grâce à un fluide caloporteur. La combustion n'ayant pas lieu à l'intérieur du moteur, diverses sources peuvent être utilisées ; par exemple, coupler une chaudière à un moteur Stirling utilisant les gaz de combustion permet de la transformer en « chaudière électrogène ». Des appareils domestiques reposant sur ce principe sont d'ores et déjà sur le marché.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Les sources de chaleur basse température représentent plus de la moitié des sources de chaleur disponibles mais leur potentiel est encore sous exploité car les technologies actuelles sont trop chères, insuffisamment performantes ou adaptées aux multiples formes sous lesquelles ces sources sont disponibles. L'amélioration des technologies existantes et le développement de nouvelles technologies de valorisation sont des enjeux majeurs pour ce marché.

Ces technologies contribuent directement à l'amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques, quel que soit le secteur concerné – même si elles sont mieux adaptées aux gisements de chaleur localisés et constants (par exemple, dans l'industrie). Ce potentiel a clairement été identifié en Europe et en Amérique du Nord.

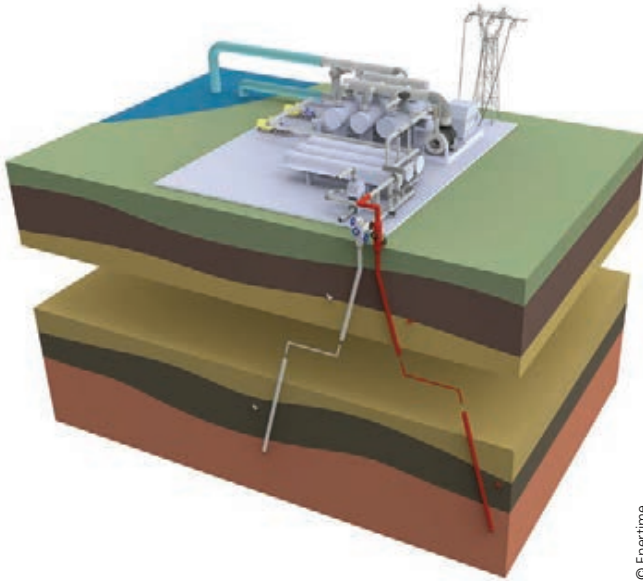
Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les technologies de récupération de chaleur à basse température sont :

- 1 Matériaux avancés et actifs
- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique

Il n'y a pas de technologies influencées par les technologies de récupération de chaleur à basse température.

Les marchés



© EnerTime

Les équipements de valorisation de chaleur basse température représentent à l'heure actuelle des niches de marché relativement hétérogènes de part les conditions économiques défavorables, principalement les coûts d'investissement.

Les systèmes ORC ont été commercialisés à partir des années 1980. La puissance totale installée dans le monde atteignait 600 MW au début des années 2000 ; le marché s'est ensuite développé, au rythme d'environ 100 à 200 MW supplémentaires chaque année. La valorisation de chaleurs fatales concerne environ 20 % des installations actuelles, les autres étant associées aux énergies renouvelables (principalement géothermie et biomasse). On peut noter au passage que dans le secteur de la géothermie, les ORC sont largement plus utilisés que les cycles Kalina (6 MW recensés en 2014).

Le marché actuel des machines à absorption est principalement constitué d'équipements dédiés à la climatisation. Il s'agit plus spécifiquement d'équipements alimentés au gaz, adaptés à des zones géographiques dans lesquelles les pics de consommation d'électricité en été peuvent rendre ce mode de climatisation plus intéressant. De ce fait, le marché est principalement localisé en Asie. L'utilisation de machines à absorption pour valoriser de la chaleur fatale ne fait pour l'instant l'objet que d'opérations ponctuelles. Là encore, la recherche de fluides de travail mieux adaptés, d'équipements moins chers est fondamentale.

Étant donné leur coût encore trop élevé, les générateurs thermoélectriques restent principalement réservés à des usages dans le spatial ou le militaire ; le marché total était évalué à 45 M\$ en 2012.

Les défis technologiques à relever

Captation De nombreuses sources ne sont habituellement pas adaptées à la récupération de chaleur par les techniques conventionnelles. Un exemple est celui des pertes de chaleur sur des parois latérales, comme dans le cas des fours verriers ou des creusets, ou bien des produits et sous-produits de la vapeur. Des technologies de captation pour amener ces sources non conventionnelles jusqu'à un échangeur thermique sont à considérer.

Corrosion La corrosion induite par les fluides diminue l'efficacité et la durée de vie des échangeurs. Plusieurs approches peuvent être envisagées : matériaux intrinsèquement résistants à la corrosion ; substitution par des fluides moins corrosifs. Par ailleurs, en plus de la corrosion, des substances peuvent venir se déposer sur la surface des échangeurs, ce qui entraîne des pertes de rendement. Ces phénomènes peuvent être limités par une conception adaptée des surfaces d'échangeur et des systèmes de nettoyage des installations.

Transfert thermique La récupération de la chaleur de fluide à basse température nécessite une surface spécifique pour optimiser le transfert thermique. Ce problème est particulièrement présent lorsque le fluide est un gaz. Le développement de matériaux avec des coefficients de transfert thermique élevés tel que des céramiques est une voie possible. L'augmentation de la surface spécifique d'échange du matériau en le structurant à une petite échelle contribue également à améliorer le transfert.

Cycle Rankine Les performances du cycle Rankine, en termes de tolérance aux fluctuations de température et d'efficacité, dépendent fortement du fluide utilisé. Le développement de nouveaux fluides avec des coefficients de transfert thermique accrus et pouvant être utilisés à basse température est un des principaux enjeux pour cette technologie.

Générateurs thermoélectriques La diminution du coût et l'amélioration des performances des générateurs thermoélectriques concernent principalement celles des matériaux semi-conducteurs les constituant.

Un des principaux défis technologiques est de minimiser la conductivité thermique sans diminuer celle des électrons. La structuration des matériaux à une échelle micro- voire nanométrique ou la réalisation par chimie du solide de structurations complexes, sont des approches prometteuses pour l'amélioration générale des performances. Le matériau de base utilisé doit provenir d'une source abondante, telle que des silices et des oxydes métalliques, afin de limiter les coûts.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le premier défi concerne la différence de localisation entre le gisement de chaleur à valoriser et le point d'utilisation, lorsque la valorisation est faite sous forme de chaleur ou de froid (alimentation de bâtiments ou de réseaux urbains, par exemple). La distance entre les zones industrielles où la chaleur est récupérée et les zones urbaines consommatrices est un obstacle à la diffusion de ces technologies. Il est également nécessaire que la disponibilité de la chaleur soit en adéquation avec les besoins des réseaux utilisateurs.

La valorisation sous forme d'électricité n'est pas confrontée à ce type de difficulté et, en pratique, peut être en concurrence directe avec la voie thermique. Le coût du kWh ainsi produit est un enjeu-clé.

De façon générale, quel que soit le système considéré, les dépenses en investissement initiales sont largement

supérieures à celles associées aux équipements de production d'énergie conventionnels (turbines, chaudières, pompes à chaleur électriques, etc.). L'intérêt économique de ces technologies est qu'elles permettent de valoriser une énergie qui serait autrement perdue. Il reste néanmoins nécessaire de développer des technologies à plus bas coût et multi-applications afin de permettre leur plus large diffusion. Par ailleurs, les opérations de maintenance peuvent être importantes dans le cas de sources de chaleur polluées. Elles entraînent un coût supplémentaire qui peut mettre en péril la viabilité économique de la solution.

Les enjeux réglementaires

La loi sur la transition énergétique pour la croissance verte intègre la valorisation des énergies fatales pour lutter contre le gaspillage énergétique.

Depuis le 1^{er} janvier 2015, la transposition de la directive européenne 2012/27/UE sur l'efficacité énergétique impose la réalisation d'une étude coûts-avantages en cas de rénovation substantielle ou d'installation nouvelle pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) d'une puissance thermique totale supérieure à 20 MW. Cette étude inclut l'évaluation de l'intérêt de valoriser la chaleur fatale par un raccordement à un réseau de chaleur ou de froid. Le dispositif ne s'applique pas à la valorisation de la chaleur fatale sur site ou à la valorisation entre deux sites industriels voisins.

Analyse AFOM

ATOUTS

Gisement de chaleur basse température présent sur le territoire français

Compétences académiques en thermodynamique et en matériaux

FAIBLESSES

Déficit de mécanismes incitatifs pour la valorisation sous forme d'électricité

Faiblesse du secteur des équipements industriels en général

OPPORTUNITÉS

Fonds chaleur de l'ADEME

Projets en matière d'écologie industrielle

MENACES

Fermeture de sites industriels

Avance technologique de la concurrence à l'international

Facteurs clés de succès et recommandations

Un mécanisme incitatif pour soutenir les investissements initiaux est nécessaire pour améliorer l'intérêt technico-économique de ce type d'équipements. L'élargissement du mécanisme

des études coûts-avantages utilisé dans le cadre des ICPE, à l'ensemble des structures faciliterait la diffusion de l'emploi de ces technologies sur le territoire.

Acteurs clés :

Entreprises	AirLiquide, Alstom Hydro Power, Aqylon, Arkema, Bertin Technologies, CNIM, Enertime, Engie – Cylergie, EReiE, Hevatech, Total...
IRT, ITE, IHU	IDEEL, PS2E...
Centres techniques	CSTB (également Institut Carnot)...
Instituts Carnot	IRSTEA, Energies du Futur, M.I.N.E.S. ...
Autres centres de recherches	CEA LITEN, CETHIL, CRIGEN, GRETh, PROMES...
Pôles de compétitivité	Axelera, Fibre Energivie, Tenerrdis...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Loisirs
& culture

ÉNERGIE,
Mobilité,
Numérique

Environnement, Habitat,
Santé et bien-être, Sécurité

Alimentation

► **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Photovoltaïque ; solaire ;
couches minces ; énergie
renouvelable.



Définition et périmètre

La technologie solaire photovoltaïque (PV) permet la conversion de l'énergie solaire en courant électrique. Les cellules photovoltaïques, des dispositifs semi-conducteurs, sont associées en modules d'une capacité de plusieurs centaines de Watt (W). Un système complet consiste en deux éléments de base : le module, qui contient les cellules, et le « balance-of-system » (BoS), qui contient les composants autres que les cellules. Le BoS comprend les composants électroniques (convertisseur courant continu-courant alternatif ou courant continu-courant continu, un régulateur), le câblage, les structures du support, et pour certains systèmes un stockage d'énergie, un système optique et un système de suivi du soleil. Les systèmes photovoltaïques sont hautement modulaires, de quelques W à plusieurs MW, et peuvent être connectés au réseau électrique.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Dans le cadre de sa politique de transition énergétique, la France prévoit de porter la part des énergies

renouvelables à hauteur de 23 % de sa consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de la consommation finale brute d'énergie en 2030. Le solaire photovoltaïque doit contribuer à l'atteinte de ces objectifs, notamment grâce au développement de centrales capables de produire des quantités conséquentes d'énergie.

Le secteur du bâtiment est demandeur en technologies lui permettant d'atteindre un objectif de zéro-émission de gaz à effet de serre (GES). De par sa nature délocalisée, la technologie photovoltaïque a le potentiel pour participer à cet effort et ainsi s'intégrer durablement dans le bâti.

Au niveau international, de nombreux pays développent ou envisagent l'adoption du solaire photovoltaïque comme moyen de production d'électricité afin d'augmenter la part d'énergie renouvelable dans leur mix énergétique. Dans son scénario 2DS, visant à limiter le réchauffement climatique mondial en dessous de 2°C à horizon 2050, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) fait jouer un rôle croissant au solaire photovoltaïque. Les marchés à l'export existent et sont en croissance, mais sont actuellement captés en grande partie par la production chinoise.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent le solaire photovoltaïque sont :

- 1 Matériaux avancés et actifs
- 2 Capteurs
- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique
- 23 Batteries électrochimiques de nouvelle génération

Les technologies influencées par le solaire photovoltaïque sont :

- 22 Réseaux électriques intelligents

Les marchés

Le marché mondial du photovoltaïque (incluant modules, composants des systèmes et installations) a très fortement augmenté ces dernières années et représentait un chiffre d'affaires de 91,6 milliards d'euros en 2011. Il est attendu qu'il atteigne 130,5 milliards d'euros en 2021¹. En 2013, 55 % des nouvelles installations étaient localisées en Asie, principalement en Chine et au Japon. Ce dernier, suite à

l'accident de Fukushima Daiichi, a consenti des efforts importants envers le secteur des énergies renouvelables, notamment à travers l'augmentation significative en deux ans de sa capacité de production en électricité photovoltaïque. Des installations solaires commencent à être économiquement compétitives, comme celle installée au Chili par EDF ENR Chile et le japonais Marubeni, qui vend directement l'énergie produite sur le marché. Au Texas (États-Unis d'Amérique), une installation est devenue pour la première fois partiellement opérationnelle sans subvention de sa production d'énergie.

1 – Source : EurObserv'ER.

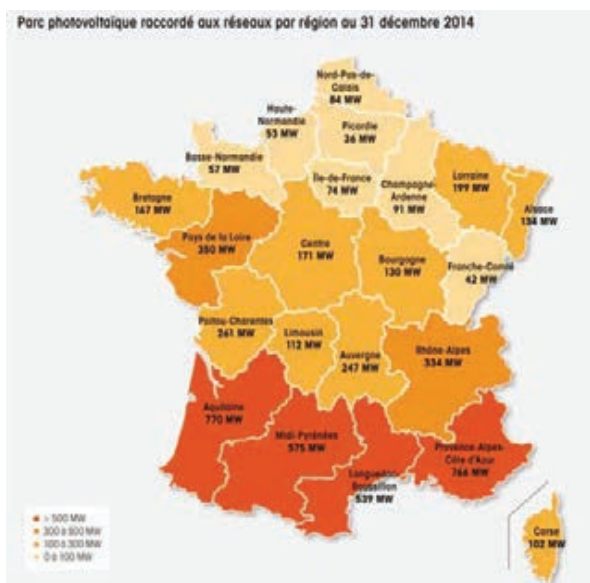
La production mondiale de modules photovoltaïques est dominée par la Chine, qui représentait 6 constructeurs parmi les 7 premiers fabricants en 2014 (1^{er} Trina Solar, 2^e Yingli Green Energy, 3^e Canadian Solar [sino-canadien]).

En France, le chiffre d'affaires de la filière est en baisse depuis 2010, année où il avait atteint 6,4 milliards d'euros, contre 4 milliards d'euros en 2013, soit une baisse de 40 %². Le nombre d'emplois liés à la fabrication des composants, aux études et à l'installation des systèmes a diminué sur la période 2012-2013, à respectivement 16 800 et 10 130 équivalents temps plein (ETP)³. L'augmentation des volumes de 2014 n'a pas encore permis de relancer la filière. Du fait de l'intensité de la crise que ce secteur a dû affronter pendant 3 ans, de nombreux acteurs du secteur ont disparu, alors que d'autres ont pu renforcer leur position. Ainsi, dans le secteur des modules, l'usine de Toulouse bénéficie de son intégration à l'Américain Sunpower (filiale

de Total, chiffre d'affaires en progression annuelle de 20 %) ; Sillia Énergie a racheté l'usine française de Bosch Solar et est ainsi devenu le premier industriel français indépendant ; et Fonroche, grâce aux exportations, a maintenu sa capacité de production.

La puissance installée sur le territoire français (France métropolitaine) s'élève à 5,3 GW en décembre 2014, soit une croissance de 21 % par rapport à la même période l'année précédente. Elle est à 80 % localisée dans le Sud : les régions Aquitaine, PACA, Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon comptent pour 50 % du parc. Les installations se répartissent de manière homogène entre 25 % de toitures résidentielles à 4 kW en moyenne, 30 % d'installations de type bâtiment, parking et serres à 116 kW et 45 % de centrales à 2,4 MW. La croissance actuelle est tirée par ce dernier segment. La France a lancé un appel d'offres photovoltaïque fin mars 2015 de 120 MWc pour des installations de moyenne puissance comprise entre 100 à 250 kWc et destinées aux toitures de taille moyenne des bâtiments industriels, tertiaires et agricoles, ainsi que les ombrières de parkings.

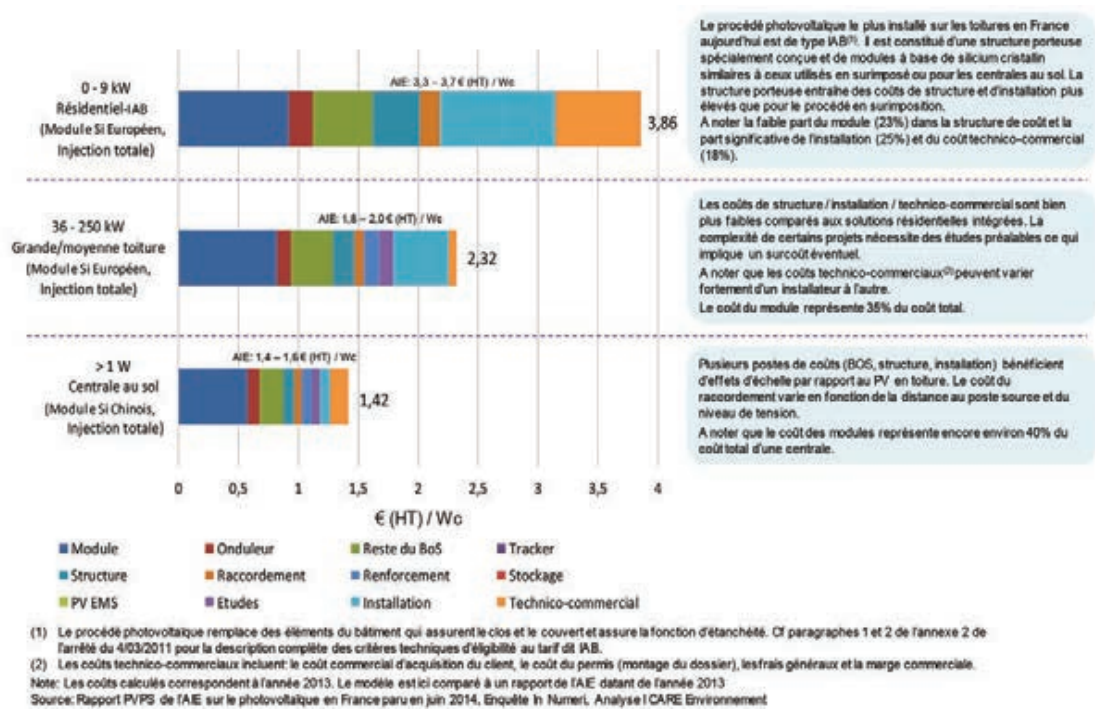
En termes de puissance installée par type d'utilisateurs, au 31 mars 2015, les installations photovoltaïques en France comportaient 17 % de résidentiel, 35 % de commercial, 48 % de centrales au sol. Selon les segments d'application, les coûts de production varient presque du simple au triple, comme illustré dans le graphique ci-après. A ces coûts s'ajoutent ceux relatifs à l'accroissement de l'intermittence, qui se traduisent par la nécessité de disposer d'infrastructures de transports plus importantes ou d'outils de flexibilité (effacements, stockage, etc.) pour y répondre.



Parc photovoltaïque raccordé aux réseaux par région au 31 décembre 2014 (source RTE/ERDF/ADÉE/FISER)

2 – Source : EurObserv'ER.

3 – Source : ADEME.



Le procédé photovoltaïque le plus installé sur les toitures en France aujourd'hui est de type IAB⁽¹⁾. Il est constitué d'une structure porteuse spécialement conçue et de modules à base de silicium cristallin similaires à ceux utilisés en surimposé ou pour les centrales au sol. La structure porteuse entraîne des coûts de structure et d'installation plus élevés que pour le procédé en surimposition. A noter la faible part du module (23%) dans la structure de coût et la part significative de l'installation (25%) et du coût technico-commercial (18%).

Les coûts de structure / installation / technico-commercial sont bien plus faibles comparés aux solutions résidentielles intégrées. La complexité de certains projets nécessite des études préalables ce qui implique un surcoût éventuel. A noter que les coûts technico-commerciaux⁽²⁾ peuvent varier fortement d'un installateur à l'autre. Le coût du module représente 35% du coût total.

Plusieurs postes de coûts (BOS, structure, installation) bénéficient d'effets d'échelle par rapport au PV en toiture. Le coût du raccordement varie en fonction de la distance au poste source et du niveau de tension. A noter que le coût des modules représente encore environ 40% du coût total d'une centrale.

Comparaison des coûts de production en France selon trois applications : résidentiel, grande toiture et centrale au sol (Source : ADEME sur la base du Rapport PVPS AIE, 2014)

Les défis technologiques à relever

Cellules solaires à hétérojonctions L'utilisation d'hétérojonctions permet l'obtention de rendements plus élevés que les solutions classiques. C'est une technologie particulièrement adaptée aux applications pour lesquelles le rapport puissance / surface disponible doit être optimisé.

Amélioration des technologies couches minces La technologie des couches minces consiste à déposer sur un support de verre, de métal ou de plastique une faible quantité de matériaux semi-conducteurs. Les matériaux utilisés au stade industriel sont le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H, technique de dépôt assisté par plasma, PECVD), les composés CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium/soufre, technique d'électrodéposition) et les composés CdTe (tellurure de cadmium).

Photovoltaïque Organique (OPV) Les cellules solaires OPV utilisent des matériaux organiques pour convertir l'énergie solaire en électricité. De par leur nature, elles peuvent être imprimées sur de multiples substrats, posséder des propriétés de flexibilité et avoir un coût moindre que les technologies existantes. L'OPV

devrait permettre l'éclosion de nouvelles applications et pourraient être plus facilement intégrée dans des produits grand public. Les développements doivent concerner le rendement de conversion énergétique et leur durabilité, et les procédés de dépôt doivent être améliorés.

Pérovskites hybrides Les pérovskites pour le photovoltaïque sont des matériaux hybrides organiques-inorganiques, tel que l'halogénure de plomb méthylammonium. Les cellules solaires basées sur ce type de matériau ont déjà atteint un rendement de 20 % en laboratoire. Ne nécessitant aucun équipement sous vide, de température élevée ou d'une salle blanche, leur simplicité de fabrication et de mise en œuvre en font une technologie prometteuse aux nombreuses possibilités d'intégration. Toutefois, des défis technologiques restent à résoudre : le remplacement du plomb par un élément non toxique ; l'augmentation de la stabilité à l'humidité ainsi qu'à la lumière. Enfin leur courte durée de vie (moins de 10 ans actuellement) est un frein à leur adoption.

Gestion de l'intermittence de la production La compensation des fluctuations de l'énergie produite est un enjeu majeur pour le développement du pho-

photovoltaïque. Afin de faciliter l'intégration de l'énergie solaire dans les réseaux électriques, il importe de lisser le courant en provenance des panneaux photovoltaïques. Le développement de technologies de stockage adaptées aux conditions spécifiques de la production de ce type d'énergie est indispensable pour le développement de la filière.

Modélisation des conditions atmosphériques Le profil de la production d'électricité photovoltaïque au cours de la journée est caractérisé par une forme de « cloche ». Le niveau de production est dépendant de l'intensité du rayonnement solaire ainsi que de la nébulosité. Le développement d'outils pour la surveillance et la prévision de ces facteurs est stratégique pour l'intégration et la prédiction de la production d'énergie au réseau électrique.

Capteurs Le développement de capteurs mesurant en temps réel les courants électriques au niveau des différents éléments des installations doit permettre la réduction des coûts de maintenance et d'exploitation. Ils apportent également des informations au réseau électrique sur le niveau de production énergétique des installations, ce qui permet une meilleure gestion de l'intermittence.

Intégration aux bâtiments Des systèmes photovoltaïques doivent être développés en adéquation avec les besoins spécifiques du bâtiment, à des fins d'autoconsommation ou dans le cadre du concept « BEPOS » (bâtiment à énergie positive). La facilité d'installation et les qualités esthétiques des modules et systèmes sont des critères importants, particulièrement s'ils sont destinés à être utilisés dans l'environnement bâti.

D'un point de vue général, la standardisation et l'harmonisation des caractéristiques physiques, mécaniques et électriques des modules pourront contribuer à réduire le coût des installations.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Le marché mondial du photovoltaïque est amené à augmenter et à prendre une place de plus en plus importante dans la production d'électricité. L'exportation est primordiale pour la filière française, le marché intérieur étant insuffisant pour assurer son développement : des entreprises comme Fonroche et ECM Technologies ont su exporter avec succès. Néanmoins, en ce qui concerne la fabrication de cellules, les acteurs

français, et européens plus généralement, ne pourront devenir compétitifs au niveau international qu'en produisant des volumes conséquents, permettant une réduction des coûts, à la manière de la stratégie adoptée par les États-Unis et la Chine.

Le bâtiment à zéro-émission représente une opportunité pour le photovoltaïque. Cette problématique, présente plus particulièrement en Europe et en Amérique du Nord, n'est pour le moment qu'un marché de niche. Il est néanmoins indispensable que les acteurs français soient prêts à accompagner la croissance de ce marché.

Les défis industriels et économiques à relever⁴

En 2014, comme les années précédentes, la majorité du marché mondial des modules était détenue par des fabricants basés en Asie⁵. Cinq d'entre eux ont fabriqué plus de 2 GW en 2013, dont trois ont dépassé les 3 GW fabriqués. En comparaison, les fabricants français présentent des capacités de production de l'ordre de 800 MW annuels.

En 2015, ne demeurent que trois producteurs de modules en silicium cristallin verticalement intégrés (du lingot au module) en Europe : Photowatt (France), Solarworld (Allemagne) et Solland Solar (Pays-Bas). Néanmoins les acteurs européens restent présents sur toute la chaîne de valeur du PV : des matériaux jusqu'aux systèmes en passant par les équipements de fabrication.

Une des principales forces des acteurs européens se situe sur les équipements de production de composants de modules (fours, ligne de fabrications, équipements de dépôts de couches minces sous vide, etc.) avec des acteurs majeurs principalement situés en Allemagne. Ce marché reste toutefois très dépendant de l'évolution des capacités de production. Par ailleurs l'automatisation des procédés de fabrication est un des leviers pour accroître la compétitivité des producteurs de modules européens.

Cependant, une montée en puissance des acteurs asiatiques sur fabrication des wafers, cellules, modules et composant BOS (« balance of system ») notamment, combinée à un marché européen en décroissance,

4 – Sources ADEME & MinEIE

5 – Les 10 principaux fabricants détiennent ainsi près de 60 % du marché en 2014.

risque de faire disparaître l'amont de la filière (équipement et matériaux) qui reste encore un point fort en Europe. On constate notamment des rachats opérés par les sociétés chinoises du secteur et des faillites successives des entreprises européennes. A contrario, apparaissent des réactions de quelques opérateurs énergéticiens de grande taille.

D'autre part, le développement de l'amont de la filière n'est que difficilement dissociable de son aval : installateurs (des sociétés de BTP et/ou de services), producteurs et gestionnaires de batteries, dispositifs de smart grids, réseaux. Par ailleurs, une offre de stockage utile pour le solaire pourrait voir le jour, bénéficiant des initiatives sur le stockage stationnaire et le développement du véhicule électrique.

La croissance de la capacité photovoltaïque mondiale installée, qui s'effectuera au sein des deux types de marchés actuels cités ci-dessus, est principalement influencée par les trois facteurs suivants :

- l'évolution du prix de marché de l'électricité (prix de gros et de détail selon l'application) comparée au coût du photovoltaïque, pour les zones où le photovoltaïque peut trouver une rentabilité économique sans soutien ;
- le maintien ou non des dispositifs de soutien, lequel dépend des évolutions comparées des coûts du photovoltaïque avec les prix de marché de l'électricité mais aussi des volontés politiques des États, pour les zones présentant actuellement des politiques de soutien ;
- Les innovations dans des secteurs soit connexes (batteries et autres dispositifs de stockage, smart grids, réseaux de transports de l'électricité) soit concurrents (autres énergies renouvelables) de nature à faire évoluer les coûts relatifs, et par là même, les parts de marché accessibles.

Par ailleurs, l'évolution du prix du CO₂ et des matières premières énergétiques, en particulier ceux du gaz et du charbon, qui ont une influence sur les prix de gros de l'électricité, ainsi que la volonté des États d'acquiescer davantage d'indépendance énergétique, peuvent avoir un impact sur les scénarios de pénétration du solaire dans le mix énergétique mondial.

De même, les problématiques d'intégration au réseau peuvent contraindre la croissance du marché, limitant la pénétration du solaire dans le mix énergétique local à un niveau défini en complémentarité avec d'autres sources de production.

Enfin, l'évolution de la consommation énergétique et le renforcement des politiques de lutte contre le changement climatique sont autant de paramètres à prendre en compte pour pouvoir modéliser les perspectives de croissance de ce marché.

À titre d'exemple, une étude récente du cabinet Bloomberg New Energy Finance estime ce marché à 200 GW/an en 2040 (pour 50 GW/an en 2015), majoritairement développé en Asie-Pacifique, avec 40 % de nouvelles capacités dédiées aux usages résidentiels, et une part du solaire dans le mix européen estimée à un tiers. Les estimations de coûts complets de l'électricité (LCOE) à 2040 pour les centrales au sol atteignent 50 \$/MWh en Chine, 60 \$/MWh aux États-Unis et 80 €/MWh en Europe. Cette étude fait cependant l'objet de controverses d'experts, estimant que le prix européen pourrait être plus faible, en particulier si des stratégies de couplage avec des développements automobiles (comparable à celle menée par Elon Musk aux États Unis, et conduisant à des économies d'échelle sur les composants) était menée à l'échelle européenne.

Les enjeux réglementaires

Le secteur du photovoltaïque est fortement sensible aux changements du cadre tarifaire. Le moratoire instauré en mars 2011 avait mis un arrêt à une période d'emballage débutée en 2008. Deux dispositifs de régulation ont été mis en place : en-dessous de 100 kW, le développement est libre et la rémunération du kW est fixée par l'État ; au-dessus de 100 kW, le développement est ouvert à la compétition mais limité par les appels d'offres où le prix du kW est subventionné. L'adoption de la loi sur la transition énergétique et des objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie qui en découleront va offrir une meilleure visibilité aux projets menés sur le territoire national.

Analyse AFOM

ATOUTS

Bonne position dans l'amont photovoltaïque (équipements pour la fabrication de cellules)

Dynamique d'exportation

Compétences de recherche de haut niveau

FAIBLESSES

Industrie française encore insuffisamment compétitive sur un marché mondial ultra concurrentiel

Difficulté à faire émerger des « champions nationaux » ou européens

OPPORTUNITÉS

Bâtiment à zéro-émission : photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV)

Programmes d'investissements internationaux

Complémentarités avec le développement du stockage d'énergie (batteries pour véhicules électriques)

MENACES

Intensité capitalistique croissante

Risques de rupture d'approvisionnement pour certains éléments critiques

Facteurs clés de succès et recommandations

Dans ses recommandations relatives aux énergies renouvelables, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) encourage à aller vers plus de stabilité législative sur le long terme afin de favoriser les investissements conséquents de ce secteur intensif en capital. Le soutien des pouvoirs publics doit se faire de manière à favoriser une rémunération rentable tout en évitant les incitations économiques trop élevées.

Les appels d'offres de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) sur des projets de centrales photovoltaïques en France ont aidé la filière à se structurer et à gagner en compétitivité. Ce type de

mécanisme, qui a permis d'augmenter la capacité des entreprises française à s'exporter, peut indirectement contribuer au développement à l'international.

Enfin, seul un investissement conséquent permettant d'obtenir des économies d'échelle grâce à un volume de production de modules suffisant permettra à la filière de gagner en compétitivité. Ce type d'investissement, de l'ordre de 2 milliards pour une usine de 1 GW de production annuelle, pourrait être réalisé dans le cadre d'un consortium européen afin de pouvoir en mutualiser les coûts.

Acteurs clés :

Entreprises	AirLiquide, Akuo Energy, Aloe Energy, Apex Energies, Arkema, Clipsol, CNR, DualSun, ECM Technologies, EDF, EDF ENR PWT, Eiffage-Clemessy, Electropôle - Schneider Electric, EliFrance, Emasolar, Emix, Exosun, Fonroche Energie, FranceWatts, Horiba Jobin Yvon, Krinner, Mersen, Neonen, Optimum Tracker, Saint Gobain – Cree, Saint Gobain Glass – Crdc, SCNASolar, SEMCO Engineering, Silia VL, Soloréa, S'Tile, Sunpartner, Sun'R, Systovi, Total – Sunpower, Voltec Solar...
IRT, ITE, IHU	Supergrid...
Instituts Carnot	Energies du Futur...
Autres centres de recherches	Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux, Institut national de l'énergie solaire, Génie Electrique et Electronique de Paris, Institut de Physique et de Chimie de Strasbourg, Institut Photovoltaïque d'Île-de-France, Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque, Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Mincees...
Pôles de compétitivité	Capenergies, Derbi, Fibre Energivie, Tenerrdis...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Eco-habitat, Sysolia...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	
En retard	●

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

43 Énergies éoliennes

Loisirs & culture
ÉNERGIE , Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Énergie renouvelable ; éolien onshore ; éolien offshore posé ; éolien offshore flottant ; turbine



Définition et périmètre

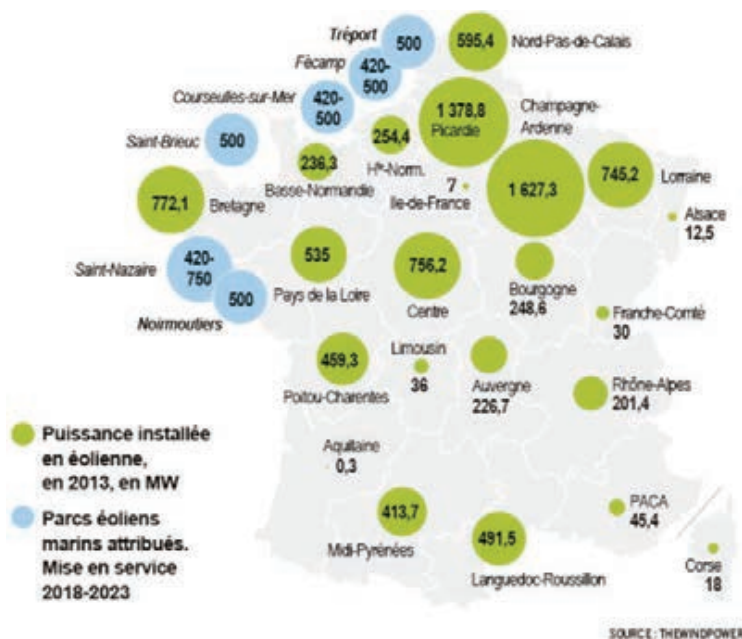
Les éoliennes concernent tous les systèmes utilisant la force motrice du vent en la collectant à travers des pales pour être convertie en électricité. On distingue trois systèmes principalement :

- Les éoliennes terrestres (onshore) qui sont installées sur terre ;
- Les éoliennes offshore posées sur le fond marin, qui reposent sur un amarrage gravitaire, une pile simple, double, par structure entretoisée (« jacket ») ou encore sur un tripode, jusqu'à 40 m de profondeur ;
- Les éoliennes offshore flottantes, qui s'ancrent au fond marin au moyen de plusieurs systèmes : flotteur colonne à grand tirant d'eau (« spar »), flotteur semi-submergé et support à lignes tendues pour des installations loin des côtes à des profondeurs plus élevées (30 à au moins 300 m).

Les éoliennes délivrant moins de 100 kW, appelé petites éoliennes, ne sont pas traitées dans cette fiche.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

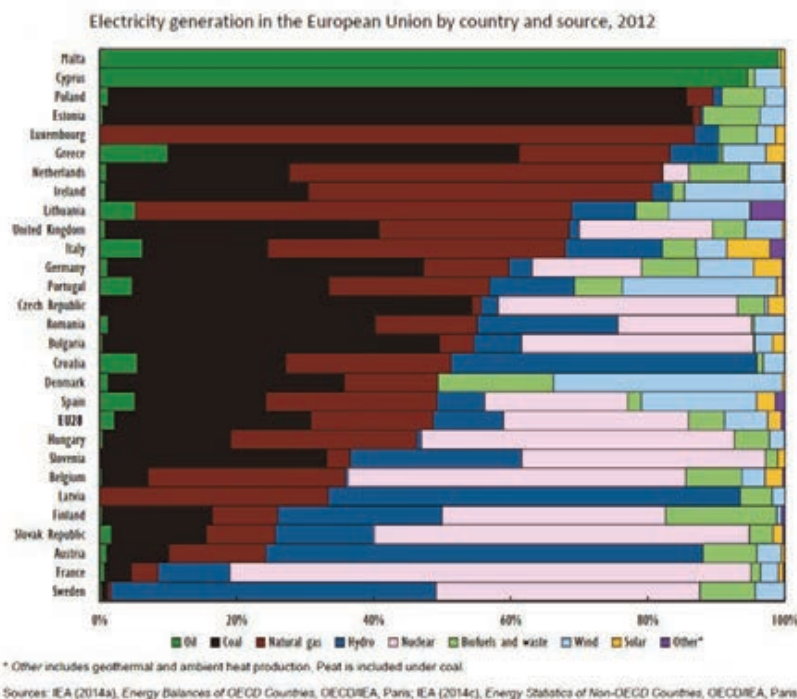
Dans le cadre de sa politique de transition énergétique à horizon 2020 et 2030, la France doit développer les énergies renouvelables. L'éolien apparaît comme indispensable pour remplir ses objectifs. Grâce à son littoral, elle possède un potentiel important pour le développement de l'éolien offshore (sous réserve des coûts d'exploitation). Son marché national reste moins développé que celui de certains autres pays européens ayant des caractéristiques différentes de leur mix énergétique. Le développement de technologies, notamment pour l'éolien flottant, (intéressant pour les littoraux plus profonds qu'au Nord de l'UE, notamment en Méditerranée) devrait lui permettre de renforcer son positionnement, avec un fort potentiel à l'export.



Puissance installée en éoliennes, en 2013 et en MW, en France ainsi que les futurs parcs éoliens marins
(source : Thewinpower / infographie Le Monde, 2014)

Au niveau international, de nombreux pays dans le monde développent ou envisagent l'adoption des éoliennes comme moyen de production énergétique afin d'augmenter la part d'énergies renouvelables dans leur mix énergétique. Dans son scénario 2DS, visant à limiter le réchauffement climatique mondial en

dessous de 2°C à horizon 2050, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) fait jouer un rôle croissant à l'énergie éolienne. Au niveau européen, le graphique ci-dessous montre la part relative de l'éolien (bleu clair). Le programme H2020 énergie consacre des moyens significatifs à l'amélioration de ces techniques.



Énergies produites en Europe par les pays de l'Union européenne en 2012

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les énergies éoliennes sont :

- 1 Matériaux avancés et actifs
- 2 Capteurs
- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique
- 23 Batteries électrochimiques de nouvelle génération

Les technologies influencées par les énergies éoliennes sont :

- 22 Réseaux électriques intelligents

Les marchés

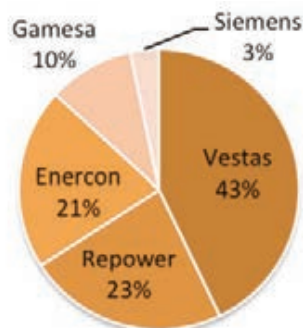
Les investissements globaux du secteur de l'éolien dans le monde en 2013 se sont élevés à 59,2 milliards d'euros. La capacité mondiale installée et reliée à un réseau, au cours de cette même année, a été de 35 289 MW dont 16 088 MW pour la Chine (45,6 %), 12 031 MW pour l'Europe (34,1 %), et 1 084 MW pour les États-Unis (3,1 %). Depuis 2009, le plus grand marché pour l'éolien est la Chine¹. Le GWEC s'attend à ce que le marché global de l'éolien dans le monde ait

un taux de croissance annuel entre 6 % et 10 % sur la période 2015-2018. En 2013, la France a installé pour 631 MW de capacité d'éolien ; les principaux fournisseurs d'équipements de son marché, classés par puissance installée, ont été Vestas (39 %), Repower (21 %), Enercon (19 %), Gamesa (9 %), Nordex (9 %) et Siemens (3 %)². Le gouvernement français avait fixé un objectif de 25 GW installé d'énergie éolienne, dont 6 GW d'éolien offshore et 19 GW pour l'éolien terrestre en vue de remplir son objectif de 23 % de production d'énergie à partir de sources renouvelables en

1 – Source : Global Wind Energy Council (GWEC).

2 – Source : France Énergie Eolienne.

2020. La contribution directe du secteur éolien (terrestre et en mer confondus) au PIB de l'Union Européenne était de 17,6 milliards d'euros en 2010 pour 154 150 emplois.



Principaux fournisseurs d'équipements du marché français en 2013, classés par puissance installée

L'éolien terrestre Le parc français a représenté 3,7 % de la consommation d'électricité produite en France en 2014. Le nombre d'éoliennes raccordées au réseau a augmenté pour la première fois en quatre ans. La puissance installée en France métropolitaine a été de 963 MW selon le Syndicat des Energies Renouvelables (SER), soit 12 % de plus qu'en 2013. L'objectif pour 2020 sera révisé dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie – PPE, en fonction des évolutions majeures intervenues dans les prix de l'énergie en 2014 et 2015).

L'éolien offshore posé 90 % des installations se situent dans les eaux européennes, dont 80 % pour seulement 3 pays : Danemark, Pays-Bas, et Grande-Bretagne. Jusqu'en 2010 et l'installation d'une ferme en Chine, le marché était à 100 % européen. Au niveau mondial en 2013 pour l'éolien offshore, les fournisseurs leaders sur chaque marché du secteur de l'éolien étaient : Siemens pour les turbines (69 %), DONG Energy pour le développement (48 %) et Bladt pour les sous-structures (37 %)³. L'investissement global en Europe pour l'éolien offshore a fortement augmenté en 10 ans. De 0,25 milliard, il est passé de 4,6 à 6,4 milliard d'euros en 2013⁴. La France, afin de remplir son objectif (en cours de révision dans le cadre de la PPE) d'installer 6 GW d'éolien offshore, avait lancé un 1^{er} appel à projet (clôturé en

avril 2012) pour la construction de fermes dans la Manche. La part de l'investissement de l'État français porte sur 7 milliards d'euros et il en est attendu de créer 10 000 emplois d'ici à 2018. Il a été remporté par le consortium EDF Energies Nouvelles/Dong Energy Power/Alstom pour trois des cinq zones. Une 4^e zone a été attribuée au consortium Iberdrola/Eole-Res/Areva tandis que la 5^e zone n'a pas été attribuée. En janvier 2013, un second appel à projets a été remporté par Engie, pour deux sites. La capacité totale ainsi attribuée par ces appels d'offre est de 2,9 GW. Le montant total de ces deux appels devrait s'élever à environ 30 Md € et devrait permettre la création d'environ 10 000 emplois directs (l'impact indirect via les coûts de l'énergie n'est pas chiffré). Les régions littorales sont en train d'identifier les zones qui seront soumises à la compétition pour le troisième appel d'offres éolien offshore⁵.

L'éolien offshore flottant La France ambitionne de faire partie des leaders de ce secteur émergent. Plusieurs groupes sont impliqués, comme DCNS et EDF, ainsi que des start-ups innovantes comme Ideol et Nénuphar. Dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir (PIA), l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME) a lancé en 2013 un Appel à Manifestations d'Intérêt (AMI) « Énergies marines renouvelables : briques et démonstrateurs », ouvert jusqu'au 2 octobre 2015 : les projets sélectionnés permettront de tester la fiabilité et les performances de trois technologies innovantes, dont l'éolien flottant. Dans ce domaine, un appel à projets « Fermes pilotes », doté de 150 M€, devrait être lancé par l'ADEME.

Entre la fabrication et l'installation des équipements puis la vente de l'énergie, l'éolien a concerné en France 3 730 emplois directs en 2014 selon l'ADEME⁶. Si la fabrication et l'installation avaient connu une baisse du nombre d'emplois générés jusqu'à l'année 2013, la vente d'énergie éolienne connaît une croissance ininterrompue. Selon l'édition 2014 du baromètre d'EurObserv'ER, 20 000 emplois en France ont été concernés en 2013 directement ou indirectement par le secteur de l'éolien. Ce chiffre est constant depuis 3 ans.

3 – Source : GWEC.

4 – Source : European Wind Energy Association (EWEA).

5 – Source : Greenunivers – Rapport CleanTech, 2015.

6 – Source : ADEME – Stratégie & études – n°43, 2015.

Les défis technologiques à relever

Gestion de l'intermittence La compensation des fluctuations d'énergie produites par les éoliennes est un enjeu majeur pour leur développement futur. Afin de faciliter l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques, il importe de lisser le courant en provenance des éoliennes. Le développement de technologies de stockage adaptées aux conditions spécifiques de la production de ce type d'énergie est indispensable pour le développement de la filière.

Indépendance vis-à-vis de métaux critiques. Les aimants permanents permettent de limiter le surpoids de la génératrice et d'obtenir les meilleurs rendements de conversion de l'énergie mécanique en électricité. Néanmoins, la quantité de néodyme (Nd), élément de la famille des terres rares, nécessaire par MW installé est comprise entre 400 kg⁷ et 700 kg⁸. Les exploitations de terres rares se situent très majoritairement en Chine et leur prix a connu une très forte augmentation en 2011 lorsque la Chine a instauré des quotas sur leurs exportations, puis, a décliné alors que des pressions internationales se sont fait jour pour influencer cette stratégie, et que d'autres sources étaient simultanément développées hors de Chine. Technologiquement, des solutions existent ou sont en développement pour diminuer voire arrêter l'utilisation d'aimants permanents. Le mode d'entraînement du rotor en est un paramètre déterminant. En effet un entraînement direct nécessite un générateur plus gros et c'est pour limiter sa taille que des aimants permanents sont utilisés. Une alternative est le système hybride qui utilise un seul palier de multiplication. Cette technologie, alliant aimants bobinés et aimants permanents permet un rendement similaire à celui rencontré avec un générateur à aimants 100 % permanents. La plupart des constructeurs d'éoliennes terrestres, ainsi que certains fabricants offshore comme Vestas utilisent une boîte de vitesse classique pour éviter le recours aux aimants permanents.

Furtivité On parle ici de furtivité électromagnétique et aérodynamique. On estime de 3 000 à 4 000 MW le nombre de sites français propices à une installation d'éoliennes qui seraient actuellement difficilement

exploitables du fait des perturbations générées sur les radars par le mouvement des pales. En effet, les surfaces équivalentes radars (SER) présentées par les aérogénérateurs sont importantes et variables dans le temps. Ajoutés aux mouvements de leurs pales, ces paramètres sont pénalisants pour le traitement des données radars. L'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) recommande des zones de coordination comprises entre 5 et 30 km suivant les cas (*Circulaire du 3 mars 2008 sur les perturbations par les aérogénérateurs du fonctionnement des radars fixes*). Les radars concernés peuvent être ceux de l'Aviation civile, de la Défense nationale, de Météo-France et des ports et navigation maritime et fluviale (PNM). Le développement de technologies permettant de réfléchir au minimum les ondes électromagnétiques des radars permettrait d'accéder à de nombreux gisements. Une solution consiste à recouvrir les pales par des matériaux absorbant les ondes électromagnétiques. Un problème est de contenir le surpoids induit qui est de 2 à 3 %.

L'amélioration de leur furtivité aérodynamique permettrait de diminuer leur impact sonore tout en augmentant les performances de l'éolienne. En effet, le bruit généré par les installations fait partie des motifs d'opposition locale aux éoliennes les plus fréquents.

Construction d'équipements plus grands Des constructions plus grandes permettent d'augmenter la production d'électricité mais aussi d'investir des zones où les vents sont trop faibles pour les petites installations. En effet, les zones les plus venteuses ont été investies en premier. Pour augmenter la capacité de production, il est nécessaire d'investir les zones initialement délaissées (par exemple, celles avec des vents de classe 3, soit 7,5 mètres par seconde sur l'année) car jugées non rentables. Des éoliennes ayant des diamètres de 150 m sont actuellement développées pour aller dans ce sens.

Matériaux composites Les éoliennes ont besoin de pales légères, résistantes ainsi que flexibles. La légèreté leur permet de démarrer plus rapidement et de fonctionner même par vent faible. Un des enjeux est de ne pas alourdir l'ensemble afin de ne pas créer un surcoût à la construction. Un allègement de quelques pourcents sur les pales a des répercussions positives sur toute la structure : moins d'efforts sur les parties fixes, structures porteuses plus faiblement dimensionnées, etc. Néanmoins, cette réduction de poids ne peut se faire au détriment de la résistance mécanique

7 – Source : Report from the Rare Earths conference Beijing, Jack Lifton, 2010.

8 – Source : Report for Department for Transport and Department for Business, Hüdai Kara, 2010.

et ce quelles que soient les conditions. En effet, les matériaux doivent pouvoir supporter de basses températures et la formation de givre (problème récurrent pour certains pays de l'Europe du Nord mais aussi pour certaines régions françaises). Enfin, les matériaux doivent avoir une durée de vie en adéquation avec celle des turbines qui sont conçues pour fonctionner durant 25 ans (20 ans auparavant).

Capteurs Le développement de capteurs pour la surveillance à distance des installations doit permettre la réduction des coûts de maintenance et d'exploitation des éoliennes.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Contrairement aux acteurs allemands ou danois, les acteurs français ne sont pas leaders sur leur marché national. Toutefois, ils ont beaucoup bénéficié des appels à projets, en offshore par exemple.

Le développement de la filière passera par l'exportation. Par exemple, le principal marché d'Alstom est au Brésil, avec 3 GW installés ou en cours de construction fin 2014. Dernièrement il a signé son premier contrat auprès de Deepwater Wind pour fournir cinq turbines. Areva a gagné l'appel d'offre pour le parc allemand de Wikinger.

La stratégie d'alliance a permis au secteur français de se développer : ainsi Areva s'est allié à l'espagnol Gamesa pour viser 20 % du marché européen.

L'éolien flottant doit encore convaincre qu'il peut être une solution d'avenir. Alstom et DCNS se sont alliés pour développer et commercialiser un système semi-submersible de 6 MW. La start-up Nénuphar développe son concept d'éolienne à axe vertical et participe à plusieurs

projets européens impliquant EDF EN et Areva. L'entreprise EOLFI développe également des solutions.

Enfin la question de l'acceptabilité des éoliennes du point de vue esthétique est un frein à leur diffusion. À l'instar de ce qui s'est produit avec l'éolien terrestre, les projets d'éoliennes en mer peuvent rencontrer de fortes oppositions locales (marins pêcheurs, riverains, professionnels du tourisme, etc.), se traduisant parfois par des recours en justice.

Les enjeux réglementaires

Le secteur de l'éolien est fortement sensible au changement de réglementation tarifaire et d'implantation. Par le passé, les changements réglementaires ont fortement affecté le développement de la filière, freinant les investissements. A l'heure actuelle, celle-ci reste dans l'attente des objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie qui découleront de la loi de transition énergétique pour la croissance verte.

La réglementation concernant les zones de coordination pour les radars est un enjeu important pour l'installation de nouveaux sites.

La loi Brottes, adoptée en avril 2013, supprime les zones de développement éolien (ZDE). Auparavant, seules les éoliennes installées dans ces zones pouvaient bénéficier de l'obligation d'achat de leur production d'électricité. Ce sont maintenant les schémas régionaux éoliens qui orientent les implantations éoliennes en tenant compte des zones du territoire favorables au développement de l'énergie éolienne. Les installations de moins de cinq mâts peuvent à présent bénéficier du tarif d'achat.

Un nouvel arrêt tarifaire a été publié au journal officiel le 1^{er} juillet 2014 permettant de sécuriser le tarif d'achat.



Analyse AFOM

ATOUTS

Gisement éolien offshore significatif.

En pointe sur le développement de l'éolien offshore flottant.

Présence de grands groupes dans les activités prépondérantes de la filière : construction des fondations, raccordements au réseau électrique, installation, exploitation et maintenance.

FAIBLESSES

Filière qui s'est structurée plus tardivement que dans d'autres pays européens.

Complexité administrative des projets développés sur le territoire national.

OPPORTUNITÉS

Appels d'offres nationaux et internationaux, motivés par les engagements en matière de production d'électricité d'origine renouvelable.

Gains de compétitivité du kWh électrique d'origine éolienne.

MENACES

Intensité concurrentielle forte, en particulier au niveau européen, mais également chinois.

Conflits d'usage sur les zones d'implantation.

Facteurs clés de succès et recommandations

Le publication d'appels d'offres par l'État pour de nouvelles capacités de production d'énergie renouvelable, dont l'éolien offshore, a permis de développer et structurer la filière.

Il apparaît tout d'abord essentiel de renforcer l'offre française sur l'ensemble de la chaîne de valeur, notamment sur les composants. Les principaux besoins de développements technologiques concernent

l'éolien offshore flottant, lequel ne peut bénéficier que de transferts très limités de technologies issues de la filière de l'éolien terrestre. En revanche, l'expérience acquise dans le cadre du développement de cette dernière a montré la nécessité d'outils de concertation avec les parties prenantes de chaque projet afin de prendre en compte les différents aspects relatifs aux dimensions sociales.

Acteurs clés :

Entreprises	Akuo Energy, Alstom Hydro Power, Areva, BeAM, Boralex, DCNS, EDF, Eole-RES, Eolfi, Fouré Lagadec, FrancEole, Ideol, Leroy Somer, Nass & Wind, Nenuphar Wind, Neonen, Nexans, Plastinov, Quadran, Rollix, Saipem, STX, Vergnet, Vinci Energies, Voltalia...
IRT, ITE, IHU	IRT Jules Verne, FEM, Supergrid ...
Instituts Carnot	ESP...
Autres centres de recherches	IFPEN, IFREMER...
Pôles de compétitivité	Capenergies, Pôle Mer Bretagne Atlantique, Pôle Mer Méditerranée...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

44 Technologies pour l'énergie nucléaire

Loisirs & culture
ÉNERGIE , Mobilité, Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► **Nouvelle technologie clé**

MOTS CLÉS

Nucléaire ; exploitation
et maintenance ;
démantèlement.



© EDF - CONTY Bruno

Définition et périmètre

Les technologies pour l'énergie nucléaire concernent l'ensemble des outils destinés à la conception, la construction et la mise en service, la maintenance, l'assainissement, le démantèlement et le réaménagement des installations (centrales nucléaires, réacteurs de recherche, usine de retraitement et d'enrichissement, etc.). Elles relèvent de domaines variés : simulation numérique, robotique, instrumentation, techniques de décontamination, etc.

On peut citer les grandes familles suivantes :

Modélisation & simulation numérique Elle consiste en la représentation virtuelle des systèmes nucléaires (réacteur et cycle) afin de fournir un outil aux industriels et à la recherche pour explorer des domaines difficilement accessibles, comme le comportement des installations nucléaires en situation accidentelle, comprendre des phénomènes physiques et confronter ces modèles avec l'expérience, et optimiser les coûts et les durées de conception. Elle utilise des logiciels où sont retranscrits des modèles théoriques ou phénoménologiques sur le comportement des éléments du système. En raison du caractère multi-physique du comportement des réacteurs, ces logiciels peuvent être couplés afin de couvrir différents aspects : conception, exploitation et études de sûreté.

Ce n'est pas une des grandes familles technologiques du nucléaire, et les technologies correspondantes ne s'appliquent qu'au démantèlement.

Il s'agit d'un enjeu de 2^{ème} ordre.

Conditionnement des déchets et stockage : Le conditionnement des déchets dépend des étapes de segmentation et de décontamination. Les déchets nucléaires sont conditionnés dans une matrice possédant plusieurs barrières ayant pour objet de les isoler et ainsi que de bloquer la migration des radionucléides dans l'environnement. Ces matrices, principalement en verre et ciment, sont spécifiques pour le nucléaire car leur durée de vie doit être au minimum de l'ordre du millénaire. Pour les déchets de haute activité issus du traitement des combustibles usés, les matrices vitreuses sont utilisées.

Instrumentation et composants : L'instrumentation pour le nucléaire regroupe des applications et des

technologies multiples permettant d'obtenir des informations de natures variées (imagerie, composition de la matière, etc.) : capteurs de neutrons, fibres optiques durcies, contrôle non destructif (CND), capteurs à ultrasons, etc. Parmi les technologies CND, on peut citer la Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), une technique d'analyse purement optique permettant des mesures multi-élémentaires simultanées, à distance, et sur tous types de matériaux (solides, liquides, gazeux, etc.). Elle est adaptée à l'analyse en conditions extrêmes, par exemple à distance de matériaux portés à très haute température, ou encore de certains matériaux radioactifs.

Les technologies de réacteur dites de 4^e génération, (réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium -filiale de référence- et réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz -option à plus long terme- dans les deux types considérés par la France sur les 6 types internationaux retenus par le forum génération IV) étant donné leur horizon temporel éloigné, n'entrent pas dans le périmètre des Technologies-Clés 2020.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La mise en œuvre des EPR, l'entretien des installations nucléaires de base (INB), combiné à la fin de vie de certaines d'entre elles, requièrent la maîtrise de nombreuses technologies. Les nécessités de l'environnement nucléaire impliquent des compétences et un niveau de maîtrise spécifiques.

Les travaux qui seront lancés à l'occasion du Grand Carénage et les opérations de démantèlement et de réaménagement des sites nucléaires (centrales, réacteurs de recherche, installations du cycle du combustible) et sont autant d'opportunités pour la filière nucléaire française, qui a constitué un savoir-faire spécifique grâce aux premiers chantiers engagés sur le territoire national.

Au-delà des enjeux en termes d'activité et d'emplois pour la filière, (en cours de réorganisation en 2015) les opérations de rénovation et de modification sur le parc de centrales en exploitation permettront de rapprocher aussi raisonnablement que possible le niveau de sûreté des réacteurs existants de celui des réacteurs de génération 3 (EPR).

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies générales clés qui influencent les technologies pour l'énergie nucléaire sont :

- les capteurs,
- la modélisation, simulation et ingénierie numérique,
- les technologies d'information et de communication.

Les marchés et l'emploi

La filière industrielle nucléaire, qui rassemble 2 500 entreprises employant près de 220 000 salariés (emplois directs et indirects) particulièrement qualifiés, génère en France un chiffre d'affaires de 46 Md€ dont 14 Md€ de valeur ajoutée. La filière consacre 1,8 Md€ à des activités de R&D, ce qui la place en 4^e position des industries les plus innovantes¹.

Le démantèlement des réacteurs Magnox n'est pas spécialement avancé. Par ailleurs, les chiffres avancés recouvrent l'intégralité du budget de la NDA, ne concernent pas uniquement le démantèlement des installations et surtout ne représentent un volume de chiffre d'affaires accessible pour des entreprises françaises.

À l'international, l'impact de l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi (Japon) a eu deux effets sur le secteur nucléaire. Le premier, systémique, fut le renforcement des normes de sûreté sur les centrales dans de nombreux pays, dont la France. Le second, plus localisé, est apparu en Allemagne, qui a décidé au lendemain de cette catastrophe d'anticiper la mise à l'arrêt de son parc de réacteurs. On peut également citer la Suisse ou la Belgique, qui prévoient une sortie du nucléaire à l'occasion de la fin de vie des réacteurs existants.

En France, la perspective de prolongement de l'exploitation de tout ou partie du parc existant génère un marché estimé à plusieurs dizaines de milliards d'euros d'ici à 2025 pour la seule partie allouée au « grand carénage » des centrales. Ce programme consiste en la rénovation, le remplacement de matériels, l'intégration des mesures post-Fukushima et l'amélioration du niveau de sûreté des centrales. Cela

implique le remplacement de certains équipements de grande taille : générateurs de vapeur, turbines, transformateurs, échangeurs, etc. Les petits équipements sont également concernés, tels que des capteurs qui devront être remplacés. Le total des dépenses d'EDF dans la maintenance et l'optimisation du parc nucléaire a atteint 3 milliards d'euros en 2014.

Dans le cadre des travaux de maintenance et de rénovation du parc actuel (« Grand carénage »), ce niveau d'investissement est appelé à connaître une pente ascendante dans les prochaines années, pour atteindre un plateau à 5 Mds d'euros par an et revenir ensuite à un niveau de 3 milliards par an à partir de 2025.

S'agissant du démantèlement des installations nucléaires, c'est à ce jour dans le monde un total de 100 mines, 110 réacteurs civils commerciaux, 46 réacteurs prototypes ou expérimentaux, 250 réacteurs de recherche qui ont été arrêtés. Concernant ces derniers, seulement 50 ont été démantelés. Le coût pour le démantèlement peut être très différent d'une installation à une autre.

En France, sur les 43 installations que le CEA exploite, 22 sont aujourd'hui en cours de démantèlement². Le CEA consacrera dans les années à venir environ 700 millions d'euros par an pour ses programmes d'assainissement/démantèlement, d'exploitation et de gestion des déchets ; 80 à 90 % de ces budgets bénéficieront à l'industrie française.

Les défis technologiques à relever

Modélisation & simulation numérique pour le nucléaire : Elle permet de valider un scénario, que ce soit au niveau de la conception d'un nouveau réacteur, de son contrôle/commande, ou bien de la préparation des opérations d'assainissement et de démantèlement. Par exemple, son utilisation pour entraîner ou former les opérateurs sur une intervention sera particulièrement adaptée pour les futurs chantiers.

Instrumentation :

- La caractérisation isotopique de la matière avec des capteurs intelligents et distribués (Spectrométries gamma et alpha) est nécessaire pour : (1) réaliser un

1 – Source : comité stratégique de la filière nucléaire, 2014 <http://www.entreprises.gouv.fr/conseil-national-industrie/la-filiere-nucleaire>

2 – Source : CEA, juin 2014.



concept évolué ALARA du démantèlement (cartographie en temps réel et identifications des points chaud), (2) caractériser les différents colis de stockages pendant leur réalisation et mouvements (activité spécifique et totale pour établir la catégorie spécifique des déchets), (3) assurer la qualité des procédés des usines de fabrication du combustible, (4) le retraitement du combustible nucléaire (U-Pu % dans différents phases) et (5) pour la caractérisation et optimisation de l'exploitation sans avoir besoin de mesure reporté en laboratoire. Le même concept est applicable aux réacteurs nucléaires pour la mesure du « burn-up » et les chaînes des mesures radiologiques ; à la caractérisation du combustible usé ; à l'exploration minière pour l'identification de l'uranium dans des gisements à faible teneur.

■ **Caméras spécifiques** La quantification et la visualisation des points chauds émettant des rayons gammas dans des zones inaccessibles est un élément important pour planifier des opérations de démantèlement. La conception de caméras sensibles à ce type de rayonnement est nécessaire.

■ **Contrôle non destructif et à distance** L'analyse élémentaire des matériaux et à distance permet de connaître directement sur le site leur nature et d'opérer en conséquence. Le LIBS est, par exemple, une technique de choix pour cette opération. Son coût doit être réduit (en particulier pour le capteur) de manière à pouvoir généraliser son utilisation.

■ **Capteurs à ultrasons** Les capteurs à ultrasons permettent de sonder le comportement de la matière dans des zones des installations non accessibles au contrôle visuel ou plus généralement par des technologies reposant sur l'électromagnétisme. Ces capteurs peuvent être ainsi directement installés dans des conditions de haute température. Ils peuvent fonctionner en mode actif (par écho) ou passif.

■ **Fibres optiques renforcées pour l'imagerie** Les fibres optiques renforcées permettent une visualisation de zones où la radioactivité est trop élevée pour les appareils électroniques.

Matériaux et leur mise en forme : Les nouveaux matériaux doivent démontrer leur apport performance/coût et leur tenue à long terme dans des milieux extrêmes (acidité, température, rayonnement). Également, l'intégration de nouvelles méthodes de fabrication et de traitement de surfaces aux chaînes industrielles existantes restent à développer.

Technologies de l'environnement : Les composés chimiques et biologiques pour la décontamination ont pour rôle de capturer les radioéléments afin de pouvoir les traiter comme des effluents. Le développement de nouvelles technologies permettant le traitement de zones difficiles d'accès à bas coût est un enjeu majeur. Des composés chimiques et biologiques plus performants doivent être développés afin d'extraire des effluents la matière contaminée (faible et moyenne activité) qui sera ensuite enrobée dans un matériau qui garantit le stockage pour le temps déterminé.

Robotique pour le démantèlement : Afin d'intervenir sur des lieux contaminés sans exposer l'intervenant ou bien pour faciliter des tâches complexes tout en le protégeant, le développement d'équipements robotisés est nécessaire. Il peut s'agir de robots pour la reconnaissance équipés d'instrumentation pour la mesure (caméras, spectromètres, etc.) ou de bras robotisés pour la télé-opération équipés de moyens de segmentation (laser immergé ou à l'air par exemple).

À l'exception de la simulation numérique pour le nucléaire, les technologies doivent pouvoir évoluer dans un environnement radioactif ; le blindage des composants (électroniques en particulier) doit être développé en fonction du niveau d'exposition à la radioactivité.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

La maintenance et le démantèlement des installations nucléaires sont souvent réalisés par des acteurs implantés localement. S'agissant du démantèlement, c'est un marché à faible valeur ajoutée, où la pression concurrentielle est forte avec un primat donné à la maîtrise des coûts.

Il existe par ailleurs de fortes disparités selon les sites et les opérations : à l'exception des installations industrielles telles que les réacteurs d'EDF (homogènes dans leur conception), la présence de matière radioactive est localisée de manière différente suivant les installations et non pas suivant leur type. Il est par conséquent impossible de proposer des solutions complètement génériques, sur étagère, pour les moyens de démantèlement et de bénéficier ainsi d'économies d'échelle. Dans le détail, dans un réacteur nucléaire, la radioactivité est majoritairement contenue dans les structures proches du cœur soumises à l'activation neutronique ; dans une usine de retraitement de combustible nucléaire ou dans une station de traitement des effluents et des déchets, elle est située dans une multitude de zones telles que les tuyauteries, les cuves, etc. ; dans un laboratoire de recherche, elle est confinée dans des structures étanches (« cellules blindées » ou « boîtes

à gants ») qu'il est nécessaire de désassembler puis d'assainir.

Les différences de conception sont également présentes d'un pays à l'autre et exigent un effort d'ingénierie spécifique pour l'exportation d'éléments tels que générateurs de vapeur, pompes primaires et composants des circuits, tant dans la partie nucléaire que dans la partie classique énergie.

Les enjeux réglementaires

Les réglementations sur la gestion du nucléaire ainsi que les autorisations pour opérer sont spécifiques à chaque pays et dépendent d'une ou plusieurs organisations de contrôle. Des qualifications délivrées par les gestionnaires des sites nucléaires sont nécessaires. Par exemple, la Commission d'Acceptation des Entreprises d'Assainissement Radioactif (CAEAR) du CEA est compétente pour les chantiers des sites du CEA et d'AREVA.

Chaque pays a mis en place une organisation qui lui est propre. Ainsi, au Royaume-Uni, pour le démantèlement, la NDA (National Decommissioning Agency) est propriétaire des sites à démanteler. Elle sous-traite ces activités à des entreprises d'exploitation des sites nucléaires, les « Site Licence Companies », qui ont notamment en charge le démantèlement..

Analyse AFOM

ATOUTS

Maître technologique de la filière française

Capacité de R&D

Outil industriel renouvelé

Retour d'expérience du démantèlement en cours de 21 INB civiles

FAIBLESSES

Financements export peu compétitifs

Difficultés d'un petit nombre de projets de nouvelles constructions

Absence de marché domestique de construction de nouveaux réacteurs

Faible maturité industrielle du secteur du démantèlement (absence de standardisation des procédés, complexité réglementaire)

Dépendance encore forte des sous-traitants vis-à-vis des grands donneurs d'ordre français

OPPORTUNITÉS

Poursuite de programmes en croissance (Chine...) où la France est partie prenante

Augmentation de la durée d'exploitation des réacteurs en service

Amélioration de la sûreté du parc actuel

Optimisation de l'EPR

Chantiers de démantèlement programmés dans le monde, dans la limite des marchés accessibles

MENACES

Difficultés à exporter « en l'état » les technologies d'un pays à l'autre du fait notamment des contraintes réglementaires conditionnant l'accès aux marchés nationaux et/ou les coûts.

Difficultés à réaliser des économies d'échelle pour la nouvelle génération de réacteurs (standardisation).

Niveau de subventionnement d'énergies concurrentes.

S'agissant du démantèlement, concurrence d'acteurs implantés localement

Facteurs clés de succès et recommandations

S'agissant de la composante technologique des facteurs clés de succès, les nombreuses exigences liées aux réglementations et à la sûreté auxquelles sont soumis les acteurs de la filière, alliées à la complexité technologique intrinsèque à chaque installation, obligent les acteurs du nucléaire à maintenir une activité de recherche et développement (R&D) ciblée pour optimiser les outils et les procédés. La R&D est ainsi un enjeu majeur pour la

filière et doit par conséquent pouvoir bénéficier d'un soutien pérenne.

La standardisation au niveau européen mais également au niveau international pourrait permettre de faciliter l'exportation du savoir-faire français, en particulier celui développé par les PME et ETI en sous-traitance. Plus généralement, l'accès aux marchés internationaux doit être facilité et soutenu par les pouvoirs publics.

Acteurs clés :

Entreprises	ADF, Alstom Hydro Power, Areva, Assystem, Asteralis, CMR Group – France, Derichebourg, EDF, IVEA - Solution, NUVIA Process, Oreka Solutions, Séché Energie, SPIE...
Centres techniques	CETIM (également Institut Carnot)...
Instituts Carnot	M.I.N.E.S., CEA LIST...
Autres centres de recherches	CEA Cadarache, CEA Fontenay-aux-roses, CEA Marcoule, Institut de Chimie Séparative de Marcoule, Institut de Physique Nucléaire...
Pôles de compétitivité	Pôle Nucléaire de Bourgogne...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale		Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●	En position de leadership	●
Dans la moyenne		Dans la moyenne	
En retard		En retard	

45 Technologies pour la propulsion

Loisirs & culture
Énergie, MOBILITÉ , Numérique
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► Correspond à une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Moteurs thermiques, mécatronique, systèmes de conversion, électronique de puissance, véhicule électrique, turboréacteurs, GaN



© PSA-PEUGEOT-CITROËN Direction de la Communication PIZZALLA, Dominique

Définition et périmètre

Cette fiche concerne les technologies qui servent l'ensemble des systèmes et composants participant à la propulsion des moyens de transport. Elles reposent sur des principes de conversion d'énergie (chimique, thermique, électrique vers mécanique, et inversement).

Dans le secteur automobile : les principales perspectives à horizon 2020 sont le développement de véhicules 2 litres aux 100 km et l'électrification des véhicules, pour répondre aux enjeux de réduction de consommation et d'émission de polluants et de gaz à effet de serre via :

■ L'hybridation des véhicules : électrification ou intégration de systèmes électromécaniques ou oléopneumatiques (Bosch). Pour l'hybridation électrique des véhicules, deux niveaux sont à distinguer :

- Les hybridations douces à base d'alternateur-démarrateurs (*stop-and-start*, récupération d'énergie, boost) ;
- Les hybridations complètes offrant une autonomie en mode électrique avec ou sans recharge par le réseau (hybride rechargeable) ;

■ La récupération et le stockage d'énergie : par exemple, récupération de la chaleur fatale par des générateurs thermoélectriques¹. Des axes de progrès concernent également les batteries en vue de réduire leurs coûts et augmenter leurs capacités (cf. technologie clé Batteries électrochimiques de nouvelle génération) ;

■ L'optimisation d'organes véhicules classiques : les moteurs et échappements thermiques offrent toujours des perspectives d'évolution notables par un *downsizing* des motorisations. Des améliorations seront apportées sur la gestion thermique des moteurs et échappements pour augmenter le rendement moteur et intégrer de nouvelles fonctions ;

■ L'amélioration de l'électronique de puissance : la montée en puissance du contrôle électronique (calculateurs haute performance, algorithmes de contrôle intégrant de plus en plus de modèles physiques, capteurs virtuels, etc.) améliorera les performances des groupes motopropulseurs ;

■ L'optimisation continue des coûts : l'ensemble de ces améliorations doit se faire dans une logique de maîtrise des coûts. L'utilisation de matériaux alternatifs

constitue un sujet clé pour l'industrie automobile : la question de l'approvisionnement en matériaux (terres rares, cuivre, aluminium...) est un enjeu stratégique pour la filière, du point de vue du coût et de la sécurité d'approvisionnement. Le nitrure de gallium, pour des électroniques de puissance très performantes, constitue une réponse à cette problématique.

Dans le secteur aéronautique, les perspectives concernent la réduction de consommation et du bruit généré par les avions via :

■ L'optimisation de l'intégration entre le système propulsif et le système avion pour réduire la traînée, la masse et le bruit. À la base du bruit émis par l'ensemble propulsif se trouvent plusieurs sources de bruits liées aux composants du moteur (soufflante, turbines, chambre de combustion) ainsi qu'au bruit de jet (résultant du mélange des gaz chaud éjectés à haute vitesse avec l'atmosphère) ;

■ La réalisation de travaux sur de nouveaux concepts de nacelles destinées à être plus courtes et plus minces et à permettre une laminarité naturelle de l'écoulement ;

■ La proposition de systèmes propulsifs innovants : le développement des prochaines générations de moteurs reposent sur l'optimisation des technologies actuelles (turboréacteurs à fort taux de dilution)² telles que le Leap-X de CFM International (Snecma-General Electric). Le changement d'architecture avec le moteur à hélices contrarotatives non carénées « Open Rotor » fait également l'objet de recherches.

Dans le secteur ferroviaire : la large gamme des véhicules ferroviaires est adaptée à la variété des cas d'usages (tramway, trains régionaux, trains à grande vitesse). Deux modes de traction existent³ ; seule la traction électrique est réellement développée en France.

La réduction de la masse est un objectif à atteindre sur l'ensemble des véhicules. Cet enjeu touche également la chaîne de propulsion :

■ Utilisation de matériaux nouveaux (nouvelles familles d'acier, aluminium, composites...) ;

■ Nouveaux modes de mise en forme et d'assemblage ;

■ Des équipements de traction innovants ;

■ La conception de nouvelles architectures de véhicules.

1 – <http://pole-moveo.org/wp-content/uploads/2014/10/Renoter-F.pdf>

2 – <http://www.pprime.fr/?q=es/node/923>

3 – http://allianceenergie.fr/iso_album/fiche_secteur_transport_.pdf

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La famille technologique est clé à plusieurs points de vue :

- Pour soutenir une mobilité durable et tenir les engagements environnementaux fixés par les États membres (protocole de Kyoto, engagements de la COP21), la réduction de consommation des ressources fossiles est un axe prioritaire de l'Union Européenne. L'optimisation des chaînes des propulsions s'inscrit donc dans cet enjeu ;
- L'électrification des véhicules crée de nouvelles opportunités mais aussi de nouveaux risques, comme la disponibilité des terres rares qui sont utilisées dans la conception des batteries, des aimants permanents, ou encore dans l'échappement automobile (l'oxyde

de cérium, grâce à ses deux états d'oxydation, joue le rôle de régulateur de la teneur en oxygène dans les pots catalytiques). Le recours aux matériaux tels que le nitrure de gallium ou le nitrure de silicium devient donc clé. La famille technologique recouvre donc des enjeux stratégiques forts ;

- Le succès du « bas coût » et des véhicules des segments A et B (citadines et compactes) en France et en Europe témoigne de la nécessité de maîtriser les coûts dans le secteur compétitif qu'est l'automobile ;
- Enfin, ces technologies, même si elles sont maîtrisées par les grands donneurs d'ordres, ont un effet d'entraînement sur l'ensemble de la filière des sous-traitants, dont beaucoup de PME. Cet effet d'entraînement de l'innovation des PME sous-traitantes est essentiel pour assurer leur consolidation par une diversification de leurs clients et de leurs marchés.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les technologies pour la propulsion sont :

2	Capteurs
4	Modélisation, simulation et ingénierie numérique
9	Fabrication additive
12	Robotique autonome
16	Recyclage des métaux critiques et terres rares
20	Nouvelles intégrations matériel-logiciel
23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération
25	Technologies de l'hydrogène

Les technologies influencées par les technologies pour la propulsion sont :

23	Batteries électrochimiques de nouvelle génération
----	---

La modélisation et la simulation, ainsi que les technologies relatives aux matériaux avancés sont utiles pour élaborer les structures les plus adaptées avec de nouveaux matériaux plus résistants, plus légers, autoréparables, renouvelables, etc., pour améliorer les performances des systèmes propulsifs tout au long de leur cycle de vie.

- Dans l'automobile : remplacement de pièces métalliques par des pièces plastiques ou composites dans les groupes motopropulseurs,

- Dans le ferroviaire : utilisation de matériaux biosourcés pour substituer les composés d'origine pétrochimique ou organique,

- Dans l'aéronautique : utilisation de pièces composites à matrice céramique (CMC) pour la fabrication de pièces des ensembles propulsifs des avions (aubes de turbine, arrière-corps, carénage de mat moteur, ...).

Globalement, les NTIC et systèmes embarqués joueront un rôle majeur dans l'usage des moyens de transport (maîtrise des consommations, pilotage automa-

tique, véhicule autonome, utilisation optimisée des infrastructures).

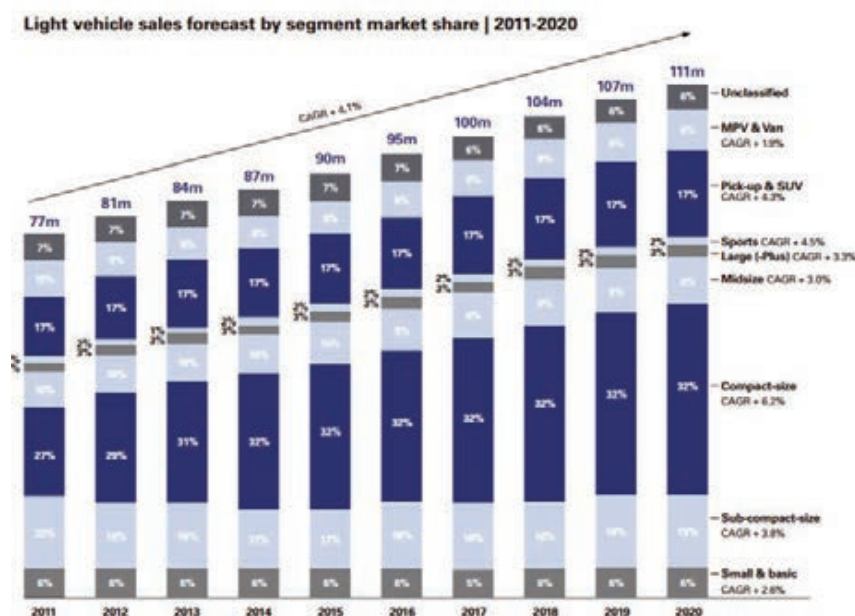
Les systèmes de récupération d'énergie au freinage devraient permettre d'améliorer le rendement global du système ferroviaire. Quatre méthodes peuvent y être déployées :

- Systèmes de stockage embarqués à bord des engins de traction (batteries, super-condensateurs, volants d'inertie),
- Utilisation de l'énergie par un train se trouvant à proximité,
- Sous-stations réversibles capables de réinjecter de l'énergie électrique dans le réseau public,
- Systèmes de stockage électrochimiques ou mécaniques stationnaires en bord de voies. Les méthodes de

gestion de type réseau électrique intelligent prennent ici toute leur place afin d'optimiser l'efficacité de la récupération et de la réutilisation de l'énergie.

Les marchés

Selon KPMG, 111 millions de véhicules légers devraient être vendus dans le monde en 2020⁴, en croissance continue et soutenue (87 millions en 2014). En raison des parcs automobiles arrivant à saturation dans les pays développés, la dynamique des ventes à horizon 2020 devrait rester faible en Europe et aux États-Unis⁵ (2 % en moyenne). La croissance mondiale proviendra donc des pays émergents (6 % par an pour le Brésil et 5 % par an pour la Chine) pour atteindre une progression moyenne de 3,5 % par an dans le monde.



Source 1 : KPMG's Global Automotive Executive Survey 2015

L'industrie automobile européenne affichait en 2012 un chiffre d'affaires total de 839 milliards d'euros et employait 12 millions de salariés qualifiés⁶.

Selon le GIFAS (Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales), le chiffre d'affaires généré par ce secteur en 2014 était de 51 milliards d'euros

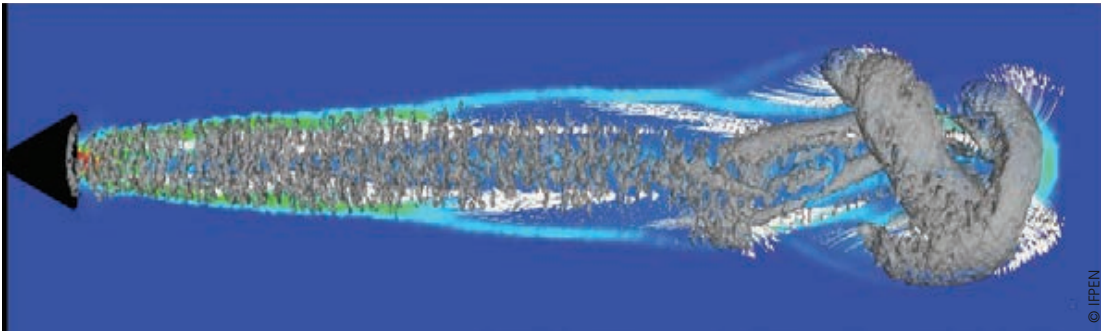
pour la France avec une très forte part à l'exportation (33 milliards d'euros). Selon Airbus et Boeing, la flotte mondiale de transport aérien devrait plus que doubler à horizon 20 ans.

Dans le ferroviaire, la France occupe le troisième rang mondial (derrière l'Allemagne et la Chine) sur un marché

4 – <http://www.kpmg.com/FR/fr/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/KPMG-Global-Automotive-Executive-Survey-2015.pdf>

5 – <http://observatoirecetelem.com/wp-content/uploads/2014/09/L-Observatoire-Cetelem-de-L-Automobile-2015.pdf>

6 – http://ec.europa.eu/enterprise/magazine/articles/industrial-competitiveness/article_11125_fr.htm



mondial accessible du ferroviaire évalué à 102 milliards d'euros en 2013. Le chiffre d'affaires de l'industrie ferroviaire française s'établissait à 4,13 milliards d'euros dont 36,6 % réalisés à l'export. La France accueille les principaux leaders européens sur son territoire et a étoffé son offre sur une grande partie des segments du marché avec les tramways et métros automatiques. Cette industrie, qui compte 21 000 salariés, est positionnée sur un marché présentant de belles perspectives à long terme (le marché mondial devrait croître de 2,8 % par an sur les six prochaines années) et sert aussi bien le marché du matériel roulant que de la signalisation.

Ces secteurs se caractérisent par une chaîne de valeur très structurée, avec des relations donneurs d'ordres-fournisseurs bien établies. Le jeu d'acteurs sur l'innovation varie selon les entreprises, mais également selon le poids des acteurs. Si les équipementiers de rang 1 ont un réel pouvoir de proposition, les sous-traitants (PME) sont souvent impliqués dans des conditions qui ne facilitent pas leur innovation directe. Il n'en reste pas moins que l'innovation portée par les assembleurs et équipementiers de rang 1 est susceptible de retomber positives sur l'ensemble des filières.

Les défis technologiques à relever

Pour les motorisations électriques avec prolongateur d'autonomie, le développement de moteurs thermiques optimisés (consommation, émissions, masse et coût) et conçus en synergie avec le générateur électrique associé constitue encore aujourd'hui un défi technique, conjointement avec l'optimisation des architectures complètes des véhicules. Parmi les enjeux :

- Réduire les composants dans les systèmes hybrides. Les perspectives à venir visent à mieux intégrer les systèmes hybrides dans la chaîne thermique,

- Alléger des composants : il est généralement admis qu'une baisse de 100 kg sur la masse d'un véhicule entraîne une baisse d'émissions de CO₂ de 5 à 7 g/km (l'objectif d'émission moyenne du parc en 2020 est de 95 g/km contre 135g/km en 2000). L'usage du plastique et des composites dans les groupes motopropulseurs associé à l'optimisation en masse des pièces pour des performances thermomécaniques adaptées est un axe de travail contribuant à l'atteinte de cet objectif.

Le Nitrure de Gallium est un matériau alternatif au silicium sur un certain nombre d'applications telles que transistors, diodes et convertisseurs de puissance. Il est pertinent en électronique de puissance car les composants peuvent travailler à des températures et tensions beaucoup plus hautes, permettant la réduction de l'empilement et des besoins en refroidissement. Il peut ainsi être employé dans le secteur automobile dans les transistors de puissance (représentant le principal poste de dépense dans un convertisseur électronique : onduleur ou chargeur) mais également dans l'aéronautique qui a besoin de convertisseurs de puissance de grande compacité et de faible masse soumis à des cyclés thermiques (faibles/fortes températures⁷). Dans le secteur ferroviaire, il peut aussi être utilisé dans les systèmes employant des composants IGBT (transistor bipolaire à grille isolée).

Une filière française est en cours de création sur ces matériaux autour d'Exagan et du PSPC (Projet Structurant des Pôles de Compétitivité) Megan porté par Minalogic et Mov'eo.

Dans le secteur aéronautique, différents axes de travaux seront travaillés :

- L'architecture des moteurs, allant vers une augmentation du taux de dilution, est un axe de travail impor-

7 – <https://hal-univ-tlse3.archives-ouvertes.fr/hal-00341009/document>

tant du secteur pour le développement des nouveaux moteurs ;

■ Aubes de turbine : des travaux sont menés pour introduire des matériaux composites à matrice céramique, très résistants aux hautes températures et plus légers que les superalliages actuellement utilisés. L'utilisation de céramiques eutectiques dans les aubes de turbine devrait se généraliser⁸, à la place des superalliages qui arrivent à leur limite de fonctionnement (1 050-1 100°C).

- La réduction du bruit se fera via :
- le développement et la mise en place de méthodologies de conception aéro-acoustique des soufflantes (aubes fixes et mobiles) ;
 - L'intégration motrice dans les nacelles et structures. Une telle évolution pose la question du partage de la valeur avec les nacellistes qui captureaient une part plus grande de la valeur.

Dans le secteur ferroviaire, bien que le rendement des chaînes de traction électrique soit élevé (0,8 à 0,9) des gains peuvent encore être obtenus par :

- L'amélioration des performances spécifiques des moteurs électriques. Ceci passe par une augmentation du rendement de conversion du moteur permettant de réduire la consommation énergétique, l'encombrement et la masse du moteur,
- L'utilisation de supercondensateurs pouvant être chargés à chaque station pour le déplacement du matériel roulant,
- L'électronique de puissance qui gère l'énergie électrique entre la source (caténaire, alimentation par le sol...) et le moteur. L'utilisation de semi-conducteurs à grande bande interdite (carbure de silicium, nitrure de gallium, à plus long terme diamant en couches minces) apportera de réelles améliorations par rapport aux systèmes actuels fonctionnant avec des composants IGBT,
- Les systèmes de récupération d'énergie au freinage permettant d'améliorer le rendement global du système ferroviaire. L'énergie récupérée doit ensuite pouvoir être réutilisée.

8 – https://www.gifas.asso.fr/fichiersPDFen/NEWS/ENVIRONNEMENT/2_-_Roeduire_la_consommation_de_koerosoene.pdf

Les défis commerciaux et d'usage à relever

L'objectif d'atteindre la consommation de 2 l/100 km pour un véhicule du segment B à un coût abordable pour le consommateur (15 000 € environ pour ce segment)⁹ constitue un défi majeur pour les acteurs français en 2020, pour atteindre des émissions de 45gCO₂/km. L'apparition de nouveaux modèles de véhicules (notamment électriques) sera susceptible d'augmenter le nombre de concurrents. En France, le développement de ces technologies créera des opportunités : particulièrement autour des infrastructures de recharge (objectif annoncé pour 2030 de déployer 7 millions de points de charge selon le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie¹⁰).

L'électrification des véhicules requiert également une diminution du coût des composants. L'internalisation de ces connaissances permet ainsi aux constructeurs de réduire la quantité d'aimants et de diminuer l'utilisation des terres rares par exemple.

Dans le secteur aéronautique, les clients ont des exigences croissantes en termes de performance des aéronefs pour leurs opérations, de robustesse (maintenance notamment), de coût d'utilisation et d'impacts environnementaux. Il est important de garder une longueur d'avance en termes d'innovation et d'offre pour répondre à ces attentes et préserver la compétitivité internationale de l'industrie aéronautique française. La décennie actuelle voit ainsi le renouvellement ou la préparation du renouvellement de produits stratégiques pour chacun des grands acteurs nationaux face à l'émergence mondiale d'acteurs nouveaux, brésiliens, canadiens, russes ou chinois. Pour Airbus, il s'agit notamment de l'évolution de la famille des moyen-courriers A320, qui a constitué le fleuron de l'industrie aéronautique française et européenne des années 1980 à 2010. Mais d'autres appareils emblématiques de l'industrie aéronautique française sont aussi amenés à être renouvelés, comme par exemple les gammes Dauphin et Super Puma. Ces appareils constituent les piliers de l'offre civile d'Airbus Helicopters, leader

9 – http://www.pfa-auto.fr/files/8114/1094/8343/communiqu_de_presse_CNF_du_17-09-14_dfinitif.pdf

10 – <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-renforcement-de-l.html>

mondial du marché des hélicoptères, mais arrivent à brève échéance en limite de vie commerciale et de capacités d'évolution, et devront demain répondre à de nouvelles exigences opérationnelles et environnementales.

Les enjeux réglementaires

Tous secteurs confondus, les enjeux réglementaires concernent la sécurité, la sûreté et le respect de l'environnement.

Le secteur de l'aviation civile, au même titre que l'ensemble des modes de transport, doit répondre aux enjeux liés au changement climatique. Le Parlement européen a ainsi décidé d'encadrer les émissions de CO₂ en taxant notamment les aéroports les plus polluants. Les quotas précédemment fixés ne faisant pas l'unanimité auprès des acteurs de la filière ont été revus en 2014. Une nouvelle soumission doit être réalisée par le Parlement en 2016 pour une application potentielle de ces quotas en 2020.

Dans l'automobile, le Parlement européen a voté l'objectif de 95 g de CO₂/km en 2020 (3,7l/100 km)

pour la moyenne des niveaux d'émissions de tous les véhicules neufs vendus en 2020 en UE. Par ailleurs la réglementation Euro 6 en cours de mise en œuvre met les exigences d'émissions des diesels sur les polluants réglementés au niveau de l'essence, nécessitant des sauts technologiques. Une autre évolution concerne le changement des cycles de mesures NEDC vers WLTP et RDE (*real drive emission*), qui visent à obtenir des niveaux d'émissions réglementés plus proche des émissions réelles.

L'arrivée des véhicules électriques et hybrides rechargeables requiert de normaliser son écosystème (bornes de recharge et itinérance de recharge). L'adoption d'une directive en 2014 a abouti à l'obligation d'installer des prises de Type 2 au détriment du Type 3 soutenu jusque-là par la France. Ce choix a induit de revoir les déploiements nationaux organisés. L'efficacité de la recharge des véhicules électriques et hybrides rechargeables passera aussi par la normalisation pour des données échangées pour assurer l'itinérance de la recharge. La création de la société Gireve est une force dans ce sens pour influencer les standards à venir au niveau de l'Europe.

Analyse AFOM

ATOUTS

Constructeurs et équipementiers automobiles à dimension internationale

Industrie aéronautique française située au premier plan mondial et PME agiles et innovantes sur tout le territoire

Lancement des IRT et ITE dédiés à la recherche technologique sur les technologies de propulsion

Forts liens entre aviation civile et militaire (dualité de la recherche, transfert d'innovations)

Présence sur de nombreux marchés dans le monde de l'industrie ferroviaire française

Qualité de la formation des ingénieurs et techniciens

FAIBLESSES

Taille des équipementiers français dans le secteur ferroviaire

Trop petit nombre d'entreprises de taille intermédiaire (ETI) dans les secteurs aéronautique et ferroviaire

Spécialisation à l'excès de PME / TPE rendant leur diversification difficile et leur santé très dépendante des conjonctures sectorielles

Présence insuffisante des acteurs français automobiles sur les marchés émergents

Absence de coordination de l'industrie ferroviaire dans le passé

OPPORTUNITÉS

Montée en innovation technologique constante dans le secteur aéronautique (développement de l'utilisation des matériaux composites)

Développement du marché automobile en Chine

Croissance du marché aéronautique mondial

Croissance du marché ferroviaire mondial, en particulier dans les pays émergents où l'urbanisation est croissante

MENACES

Approvisionnements terres rares et lithium

Contraction du marché automobile européen (marché socle de l'industrie automobile française)

Diminution conjoncturelle de l'activité ferroviaire en France sur la fin de la décennie

Difficultés à recruter des profils qualifiés (ingénieurs calcul, architecture logiciel aéronautique)

Concurrence montante des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud)

Concurrence des États-Unis dans le secteur aéronautique

Facteurs clés de succès et recommandations

Il apparaît souhaitable d'accroître l'influence de la France dans l'établissement des normes internationales. La présence des industriels à haut niveau dans les instances de normalisation et de lobbying apparaît ainsi comme un élément essentiel pour la compétitivité française dans les transports, quel que soit le mode.

De manière transversale, il apparaît également important sur ces sujets de privilégier des relations équilibrées entre donneurs d'ordre et sous-traitants pour permettre à ceux-ci de conserver leur capacité d'investissement et d'innovation.

L'industrie aéronautique française doit continuer à faire prévaloir les préoccupations de long terme dans ses choix stratégiques (industrie de cycle long). Sa position est liée à la maîtrise des technologies les plus avancées et à l'innovation. Ceci implique de :

■ Poursuivre l'effort de recherche à un haut niveau, en le faisant partager au long de la chaîne des sous-traitants et en réduisant la dispersion entre laboratoires. Le soutien de l'État, tel que pratiqué dans les pays concurrents, est recommandé ;

■ Conserver une approche suffisamment innovante dans les différents choix technologiques tout en restant à l'écoute des ruptures potentielles. La bonne identification des enjeux du futur du transport aérien (bruit, énergie fossile, productivité et réduction des coûts d'exploitation pour les compagnies aériennes) permettra de développer des produits y répondant ;

■ Conserver l'avance dans la maîtrise de l'approche « système complexe » appliquée à la conception, au développement expérimental, à la fabrication à la maintenance et à tout le cycle de vie de l'aéro-nef ;

■ Maîtriser les processus industriels de fabrication, car la qualité de l'industrie aéronautique française en dépend. Il est important que les industriels constructeurs de premier rang conservent, même dans le cadre d'un fort degré de sous-traitance et de certaines délocalisations dans des pays à bas coûts, la connaissance et la compétence sur l'ensemble des composants critiques mis en œuvre et des processus mobilisés.

Acteurs clés :

Entreprises	Alstom Transport, Bombardier, Dassault Aviation, Faurecia, PSA Peugeot Citroën, Renault Technocentre, Safran, SNCF, Thales Communications & Security, Valéo, ...
IRT, ITE, IHU	IRT Jules Verne, IRT M2P, IRT NanoElec, Railenium, IRT Saint-Exupéry, VeDeCoM...
Instituts Carnot	CEA LETI, CEA LIST, ESP, INRIA, IRSTEA, LAAS CNRS, Logiciel et Systèmes Intelligents, M.I.N.E.S., ONERA, TSN...
Autres centres de recherches	Air-ESIEA, ENSTA, IFPEN, INSA, Laboratoire HEUDIASYSC – UTC, Laboratoire ROBERVAL – UTC...
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley, Astech, IDforCAR, I-Trans, LUTB, Minalogic, Mov'eo, Pegase, Systematic, Véhicule du futur...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	Commission Régionale Des Associations de Chantier, Fédération des Industries des Equipements pour Véhicules, GIFAS - Groupements des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

46 Nanoélectronique

Loisirs
& culture

Énergie,
Mobilité,
NUMÉRIQUE

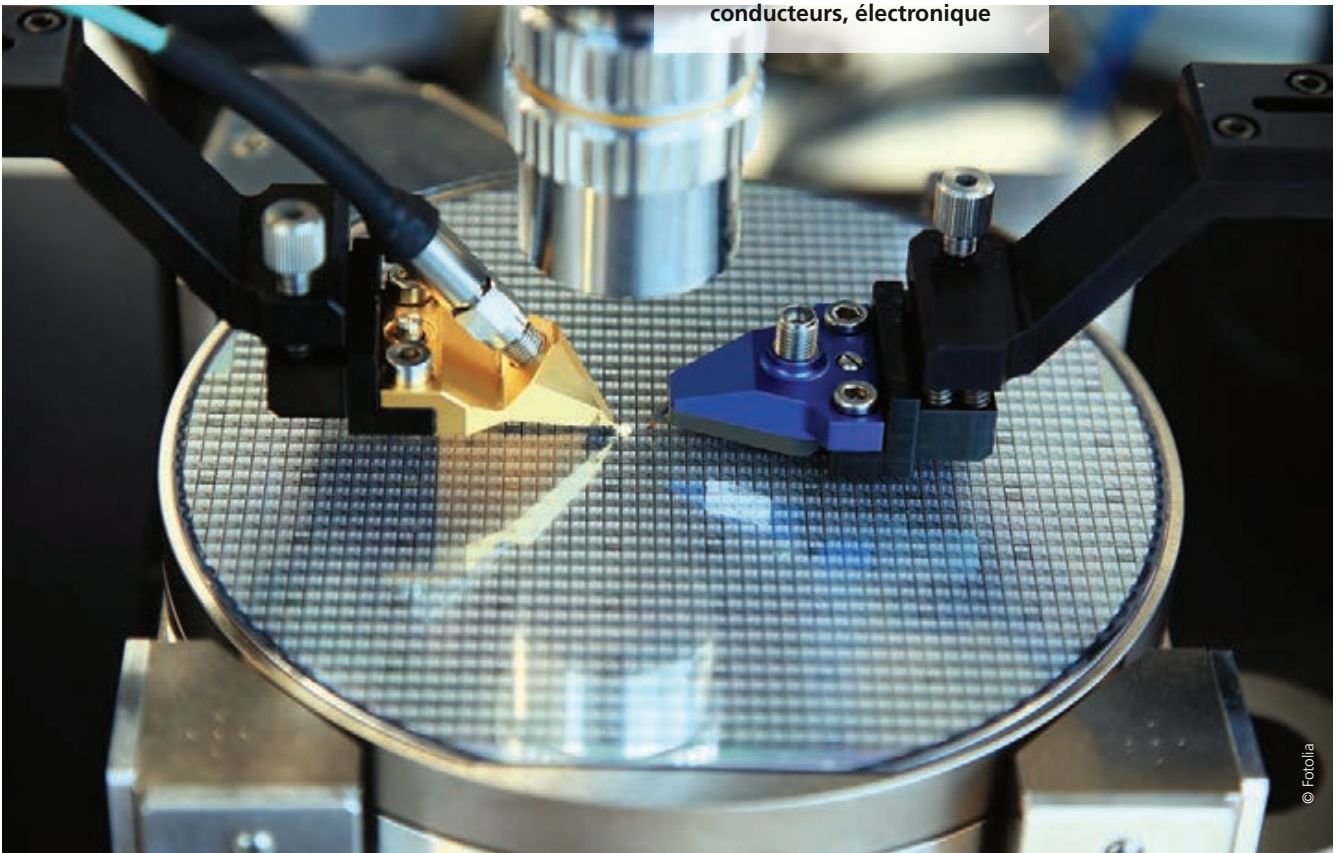
Environnement, Habitat,
Santé et bien-être, Sécurité

Alimentation

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Loi de Moore, More than Moore,
intégration 3D, photonique,
Internet des Objets, semi-
conducteurs, électronique



© Fotolia

Définition et périmètre

La nanoélectronique fait référence à la **miniaturisation (Loi de Moore) à un niveau nanométrique et la diversification (« More than Moore ») des composants et des systèmes électroniques.**

Depuis 50 ans, l'industrie électronique a suivi la **Loi de Moore¹ selon laquelle le nombre de transistors contenu dans les circuits double tous les 18 mois, à prix constant.** Cette voie, dite *top-down*, a permis de réduire le plus possible les dimensions des composants électroniques, au point d'atteindre un niveau nanométrique. Soumise à la Loi de Moore, l'industrie électronique, utilise majoritairement du silicium et la photolithographie pour graver les transistors.

Des solutions repoussant les limites de la loi de Moore sont néanmoins apparues, contredisant ainsi les prévisions du fondateur d'Intel. Ces technologies de prolongement, qui répondent à une stratégie « **More Moore** », ont permis à des sociétés telles que TSMC de proposer la fabrication de circuit de 20nm et à Samsung, de concevoir des composants de 14nm, les plus petits sur le marché à ce jour. Il s'agit de modifications de la structure des transistors :

■ La **technologie FD-SOI** (*Fully depleted silicon on insulator*) développée conjointement par Soitec, STMicroelectronics et le CEA LETI permettant d'améliorer les performances du transistor tout en réduisant, voire supprimant, les effets parasites rencontrés avec le silicium. Le développement de cette technologie est au cœur du projet Nano2017 lancé par le gouvernement en 2013 ;

■ De la **technologie FinFet²** mise au point par Intel et utilisée par Samsung, TSMC et Globalfoundries.

En revanche, les difficultés rencontrées au niveau de la poursuite de l'augmentation de la taille des transistors se posent plutôt au niveau de la technologie de fabrication, et en premier lieu de par la limitation liée à la longueur d'onde de la lumière utilisée en photolithographie. Une nouvelle technologie de gravure est ainsi en cours de développement pour remplacer

la photolithographie, ne permettant pas de graver du silicium à une finesse inférieure à 10nm : la **technologie Extreme-UV³**. Cependant, le passage en extrême UV comme les techniques de multi-patterning sont des technologies extrêmement difficiles à maîtriser et renchérissent le coût de production. Plusieurs acteurs mondiaux de la microélectronique, Samsung, Global Foundries, ont confirmé au cours des derniers mois qu'ils estimaient que le nœud 28nm aurait un coût de production moins élevé que les nœuds suivants (14nm et au-delà), ce qui fait pressentir une durée de vie plus longue pour le 28nm, **donc un ralentissement de la loi de Moore.**

En parallèle de la course à la réduction des dimensions, un nouveau champ d'innovation est apparu dans l'industrie des semi-conducteurs face à l'augmentation croissante des besoins du marché en termes d'application. On l'appelle « **More than Moore** ».

On cherche plutôt à intégrer de nouveaux nanocomposants hétérogènes sur une puce pour enrichir les fonctions des circuits, gérer leur complexité croissante et leur permettre de s'adapter à leur environnement : microprocesseurs, micro-capteurs, mémoires statique et dynamique, micro-systèmes électromécaniques (MEMS), interfaces radioélectriques, composants optoélectroniques etc.

Parmi les procédés à l'étude figure l'intégration 3D, c'est-à-dire la conception de puces au sein desquelles les composants sont empilés et non plus seulement mis côte à côte. Cette voie laisse envisager des systèmes complexes plus performants, **moins « encombrants », plus économes en énergie, et surtout moins coûteux une fois les procédés d'industrialisation maîtrisés.**

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Caractère stratégique

En raison de l'omniprésence de l'électronique dans tous les secteurs de notre économie, la nanoélectronique est stratégique car **sa maîtrise conditionne le positionnement de la France dans de nombreux**

1 – Loi empirique édictée par Gordon Moore, fondateur d'Intel à partir de l'observation d'une tendance

2 – La technologie FinFET consiste à graver des transistors verticaux sur des marches de silicium de quelques nanomètres de hauteur, en 3D et permettant aux transistors d'occuper une moins grande surface et ainsi, de réduire les courants de fuite

3 – La technologie consiste à frapper une cible d'étain sous vide avec un faisceau laser CO₂ de près de 1MW de puissance. Cette frappe pulvérise la cible et provoque l'émission de rayons X sur cette longueur d'onde. Il s'agit alors de récupérer ces rayons X à travers des miroirs et de les diriger sur la plaquette de silicium

domaines technologiques clés associés : l'Internet des Objets, les réseaux électriques intelligents, la *Cloud Computing*, etc. Cette technologie, qualifiée de *key enabling technology*⁴, est à la base de la chaîne d'innovation de nombreuses autres technologies telles que l'imagerie médicale, les capteurs ou la robotique.

Son caractère stratégique est aussi et surtout lié à **l'immense potentiel de marché que la nanoélectronique représente de par son important effet de levier sur l'innovation des autres filières** (produits et services de l'information, automobile et transport, santé, etc.). À titre d'exemple, le marché des semi-conducteurs est estimé à 300 milliards de d'euros en 2015⁵ mais son effet de levier sur les autres marchés est extrêmement conséquent (de l'ordre de six fois sa taille sur le seul marché de l'électronique).

Atouts de la France

La France dispose d'atouts lui permettant de se positionner demain en leader dans les technologies nanoélectroniques :

■ **Des centres de R&D de haut niveau** : le site de Crolles (STMicroElectronics), le CEA Leti et l'IRT NanoElec ;

■ **Des entreprises de rang mondial investissant dans la recherche en nanoélectronique** : STMicroElectronics fait partie des 10 leaders mondiaux de fabrication de composants électroniques et est au cœur du programme de R&D Nano2017, au côté du CEA Leti. D'autres grands groupes industriels sont impliqués dans la recherche et le développement de la nanoélectronique, à l'instar de Gemalto, *leader* mondial de la sécurité numérique. Alcatel Lucent et Thalès ont également à ce titre créé le **laboratoire III-V Lab**, rejoint par la suite par le CEA Leti ;

■ **La France dispose de deux pôles de compétitivité d'envergure mondiale sur la nanoélectronique** :

— **Minalogic**, qui rassemble 198 entreprises, et 13 centres de recherche et universités. Minatec, situé à Grenoble, est un complexe d'innovation unique en Europe et au meilleur rang mondial en micro et nano technologie ;

— **SCS (solutions communicantes sécurisées)**, regroupe 250 adhérents dont 16 laboratoires. Il couvre l'écosystème PACA de la microélectronique, historiquement situé autour d'Aix-Marseille et de Sophia-Antipolis, dont l'expertise en technologies analogiques sans contact et technologies pour la sécurité et la carte à puce, sont reconnus à l'échelle mondiale.

■ **Un soutien des acteurs publics français et européens forts dans ce domaine** : La nanoélectronique figure parmi les priorités de la Commission européenne qui prévoit d'investir jusqu'à 5 milliards d'euros⁶. La France a également introduit cette technologie dans les priorités du plan de la Nouvelle France industrielle⁷ et financé à hauteur de 600 millions d'euros, le **programme Nano2017** dont l'objectif est de faire de la France l'un des trois premiers du programme de recherche européen Horizon 2020.⁸ Ce plan s'inscrit pleinement dans la perspective de la **stratégie européenne pour la micro-nanoélectronique**, mettant l'accent sur les trois pôles majeurs de Crolles, Dresde et Louvain⁹.

Liens avec d'autres technologies clés

La nanoélectronique est liée à **toutes les technologies clés à l'horizon 2020 intégrant des composants électroniques** :

- L'Internet des objets ;
- Capteurs ;
- Réseaux électriques intelligents ;
- Robotique autonome ;
- Supercalculateurs ;
- Intelligence Artificielle ;
- Dispositifs Bio-embarqués ;
- Technologies d'imagerie pour la santé ;
- Systèmes embarqués sécurisés et sûrs ;

6 – Commission Européenne, « Stratégie européenne en matière de composants et systèmes micro-nanoélectroniques », Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions, Bruxelles, 23 mai 2013

7 – Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du numérique, *Les 34 plans de la nouvelle France industrielle*, 2013

8 – Direction Générale des Entreprises, « Le programme Nano 2017 »

9 – *Le programme Nano 2017*, site Internet de la Direction Générale des entreprises

4 – Commission Européenne, *High Level Expert Group, on Key Enabling Technologies*, juin 2011

5 – Reuters : *Le marché mondial des semi-conducteurs vu à \$348 mds-Gartner*, 8 juillet 2015

- Infrastructures de 5^{ème} génération ;
- Solaire Photovoltaïque ;
- Authentification forte.

Le développement de la nanoélectronique n'influencera pas seulement ces technologies mais un ensemble beaucoup plus vaste, dans de très nombreux domaines.

Les marchés

La nanoélectronique constitue un **marché majeur et très attractif qui concerne tous les secteurs de**

l'économie. En effet, omniprésents dans notre quotidien, les composants microélectroniques régissent nos ordinateurs, permettent les services sans contact, déterminent la qualité des télévisions, etc. Le développement de la nanoélectronique porte donc en elle une révolution dans de très nombreux domaines d'applications de la santé, à l'énergie, l'environnement à la sécurité.

Le document MASRI10, publié par la *Joint Undertaking ECSEL* en 2014, propose des données de marché par domaine d'applications pour éclairer les enjeux financiers de la nanoélectronique :

Marchés (non-exhaustif)	Chiffre d'affaires global
Automobile et transport Automotive semiconductors (2015)	28,7 Mds \$US
Communication et usages numériques Communications chips (2015F) Computer chips (2015F) Optical components (2015F) Siicon photonics (2015F) Set-Top Box (2013) Transceiver (2015F) Power ampliflier (2015F)	133,9 Mds \$US 117,5 Mds \$US 7,3 Mds \$US 2 Mds \$US 22,2 Mds \$US 12,1 Mds \$US 8,8 Mds \$US
Efficacité énergétique Power semiconductors (2015F)	15,6 Mds \$US
Santé et vieillissement Medical imaging equipment (2015F)	28,3 Mds \$US
Équipement, matériel et production Semiconductor equipment (2012)	39 Mds \$US
F : « Forecast », données prévisionnelles	

Source : ECSEL, MASRIA, 2014

La demande soutenue de semi-conducteurs pour les smartphones et pour l'automobile sera portée par l'explosion de l'Internet des Objets (IoT), qui offre des perspectives de croissance optimistes pour les acteurs du marché à horizon 2020 et au-delà. Selon la société d'études Gartner, le marché des semi-conducteurs pour l'IoT représentera près de **45 milliards de dollars en 2020**, contre seulement 10 milliards en 2014. Le marché de l'IoT représentera lui, environ 1700 milliards d'euros en 2021.

L'Europe et la France ont cependant **encore du retard à rattraper** sur le marché de la production de

composants électroniques, largement dominé par les 3 géants américains et asiatiques Intel, TSMC et Samsung. STMicroelectronics, Infineon et NXP, représentent des acteurs européens importants mais détiennent des parts de marché bien inférieures à leur concurrent : 2 % pour STMicroElectronics contre 10 % pour Samsung et 15 % pour Intel (Gartner, 2015). En revanche, la production européenne de composants est très bien positionnée sur les composants pour les marchés industriels : automobile, médical, aéronautique... Cette spécificité peut lui permettre d'améliorer sa position dans les années à venir, car ces marchés connaissent une plus forte croissance que les marchés télécom plus matures.

Les investissements dans des projets de recherche - au niveau européen, avec le programme Horizon 2020, et en France avec le projet Nano2017 financé dans le cadre du programme d'investissements d'avenir -

10 – ECSEL Joint Undertaking, MultiAnnual Strategic Research and Innovation Agenda, 2014

11 – Données IDC, 2015

montrent **les ambitions fortes de l'Europe et de la France de devenir leader mondial en production de composants nanoélectroniques.**

Les défis technologiques à relever

Les défis liés à la Loi de Moore

La miniaturisation des composants au-delà de 10nm pose des défis technologiques importants : comment graver sur des surfaces nanométriques des composants en limitant au maximum les courants de fuite et à des coûts toujours plus faibles?

La recherche en nanoélectronique s'oriente vers différentes alternatives à la loi de Moore, alternatives « *Beyond CMOS* » qui visent à explorer d'autres possibilités d'exploitation de matériaux autres que le CMOS¹²:

- **La spintronique**, utilisant le spin des électrons pour le stockage d'information (MRAM) ou bien dans la radiofréquence (oscillateurs GHz) ;
- **La photonique**, utilisant la lumière (photon) pour coder l'information pour des hautes fréquences ;
- **L'auto-assemblage de la matière (voie bottom-up)** : au lieu de construire un circuit et d'y graver des nano-composants, la voie *bottom-up* cherche à assembler des molécules entre elles pour former des nano-composants. Cette alternative reste pour l'instant dans une démarche très exploratoire ;
- **Le transistor à un électron** : les applications potentielles sont des électromètres miniatures (détection ultra-sensible de la charge), des mémoires, des circuits logiques, etc. Le transistor à électrons est surtout efficace à basse température (blocage de Coulomb) mais des systèmes de ce type peuvent être appliqués à la radio fréquence ;
- **L'effet tunnel résonnant** : mis en pratique au sein de diodes ou de transistors. Ce sont des dispositifs permettant de réaliser des oscillateurs, des circuits logiques, des mémoires ;
- **L'électronique moléculaire** visant à la réalisation de dispositifs électroniques (comme un processeur par exemple) constitués soit d'une seule molécule regroupant l'ensemble des fonctions requises avec une approche intégrée, soit de composants moléculaires élémentaires (une ou quelques molécules) connectés

entre eux par des électrodes dans une approche dite hybride ;

■ **L'utilisation du graphène, un nouveau matériau qui remplacerait le silicium.** Ce matériau pourrait révolutionner l'électronique car les électrons se déplacent sur le graphène à une vitesse 150 supérieur que sur du silicium. Par ailleurs, un transistor de graphène s'échauffe peu. Cette alternative, qui ne fonctionne qu'à basse température, reste pour l'instant dans une démarche très exploratoire.

Ces différentes options sont encore à des stades amonts, et ont toutes comme objectif de lever les défis liés à la puissance et la vitesse de calcul des processeurs.

L'intégration de technologies hétérogènes (*More than Moore*)

Depuis 50 ans, l'industrie du semi-conducteur suit la loi de Moore. Aujourd'hui, l'enjeu est de diversifier le contenu des puces en intégrant différents composants hétérogènes. Le nouveau pan de la recherche en nanoélectronique se trouve donc confronté à un défi de taille : comment intégrer de façon optimale des composants de nature hétérogène (analogique et numérique), tels que des MEMS, capteurs et actuateurs, etc. ? L'intégration de composants de nature hétérogène à une échelle nanométrique pose également la question de la consommation d'énergie. L'un des principaux défis en nanoélectronique est en effet de consommer peu d'énergie (donc de limiter au maximum les courants de fuite). Cette problématique est cruciale pour le développement de l'ensemble des technologies de la nanoélectronique.

Les défis commerciaux et d'usage à relever



Parvenir à proposer des puces électroniques (avec des nano-composants) à bas coût est un défi de taille. La production de nano-composants nécessite en effet

12 – CEA, *Le Nanomonde*, 2008

d'utiliser des équipements et infrastructures dont le coût est significatif. L'investissement dans de telles infrastructures est très élevé, et par conséquent, écarte de fait les acteurs n'ayant pas les capacités de production et les parts de marché suffisantes. À titre d'exemple, Samsung, devrait investir 14,7 milliards de dollars en 2015 dans les semi-conducteur¹³. De tels investissements sont possibles pour Samsung car il se positionne en numéro deux mondial sur le marché des semi-conducteurs. Le positionnement de la France en leadership sur ce marché doit donc passer par des **stratégies d'alliance entre les acteurs français de l'industrie des semi-conducteurs (producteurs et bénéficiaires)**, notamment au niveau européen et international pour partager les coûts d'investissements des futures usines de production de composants. L'absence d'une telle stratégie ou d'aide publique forte dans le secteur ferait courir le risque à STMicroElectronics, de devenir « *fabless* »¹⁴ c'est-à-dire de ne plus être capable de produire des composants.

Les enjeux réglementaires

Le développement de la nanoélectronique n'est **pas soumis à des contraintes réglementaires majeures** à l'heure actuelle.

La nanoélectronique se distingue en effet des nanotechnologies et nanomatériaux qui fabriquent des composants chimiques pour lesquels les potentiels risques sanitaires et environnementaux font l'objet de débats et réflexions réglementaires spécifiques. À l'échelle européenne, c'est le règlement Reach, relatif à l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques, qui encadre ainsi le développement des nanomatériaux et nanotechnologies.

Le semi-conducteur n'utilisant pas de nano-objets libres dans ces procédés de fabrication il n'est pas impacté par le règlement Reach. En revanche, un certain nombre de substances visées par la réglementation Reach et exploitées par l'industrie du semi-conducteur font régulièrement l'objet de volonté de restriction voire d'interdiction, que ce soit dans les substrats (Arsenic de Gallium notamment) ou les solvants utilisés dans les processus de fabrication (notamment les substances fluorées).

13 – « Samsung, toujours champion des investissements dans les semi-conducteurs », Usine-Digitale.fr, 23/04/2015

14 – « STMicro, fabless dans cinq ans ? » L'usineDigitale.fr, 07/03/2013

Analyse AFOM

ATOUTS

Deux pôles de compétitivité mondiaux :
Minalogic, SCS

Un écosystème d'innovation de haut
niveau : CEA LETI, IRT NanoElec, Minatec,
Alcatel Thales III-V Lab, CNRS et INRIA

Un soutien politique fort en faveur
du développement de la nanoélectronique
à travers les plans « Nano2017 »
et de la Nouvelle France Industrielle

Présence d'un fabricant de semi-
conducteurs de rang mondial :
ST MicroElectronics, inventeur
d'une technologie More Moore, le FD-SOI

Présence d'un fabricant de substrats
de rang mondial : SOITEC, inventeur du SOI

Un écosystème sur le sans contact
et la sécurité reconnu mondialement

FAIBLESSES

Faible capacité d'investissements
des industriels (ST MicroElectronics)
comparé aux acteurs américains
et asiatiques

Nombre d'acteurs français peu élevé

OPPORTUNITÉS

Un marché mondial estimé à 326 milliards
d'euros en 2016 pour les semi-conducteurs

Des débouchés très importants à venir
dans l'Internet des objets dont le marché
est estimé à 1700 milliards d'euros
en 2020

MENACES

Domination des acteurs américains
et asiatiques

Risque pour STMicroElectronics
de devenir « *fabless* » en l'absence
de forts investissements dans de nouvelles
infrastructures

Facteurs clés de succès et recommandations

L'écosystème Grenoblois (site de Crolles, Minalogic, Kalray, ST Microelectronics, IRT NanoElec, CEA, etc.) fait aujourd'hui de la France un leader mondial en recherche sur la nanoélectronique. Néanmoins, sur le plan industriel, la faible capacité d'investissement de ses entreprises (notamment ST) positionne la France en retard par rapport à ses concurrents américains et asiatiques (Taïwan, Chine, Corée, Japon). Le rôle de plus en plus déterminant joué par la nanoélectronique dans l'innovation de nombreuses branches industrielles, et le potentiel de marché immense que cette technologie représente lui donne un caractère fortement stratégique pour la France.

Pour acquérir une position de leadership mondial au niveau industriel et maintenir son leadership dans la recherche, il est donc essentiel de :

- Continuer à promouvoir les interactions et les partenariats entre les acteurs publics et privés de recherche afin de favoriser un transfert rapide des

technologies. La coopération entre STMicroelectronics et le CEA LETI sur les technologies de production en FD-SOI (*fully depleted silicon on insulator*) a démontré la force du modèle français qui dispose aujourd'hui de compétences uniques au monde ;

- Augmenter de façon considérable les capacités d'investissements des acteurs du secteur afin de construire des usines de pointe à travers :

- La mise en place d'alliances stratégiques entre grands industriels fabricants et industriels intégrateurs de semi-conducteurs. La création d'un consortium d'acteurs réunissant investisseurs/intégrateurs et fabricants pourrait être une solution pour financer les usines du futur ;

- Un soutien public à l'investissement, comme ce fut le cas pour Nano2017. L'aide de l'État doit néanmoins rester un apport à la marge car elle ne constitue pas une solution de long terme pour garantir la pérennité de l'industrie française de nanoélectronique.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

Parmi les principaux acteurs français de la recherche, on compte notamment : IRT NanoElec, INRIA, CEA Leti, Alcatel Thales III-V Lab, CNRS (LAAS, NEEL, IEMN, LPN, IMS, UMP), Minatec, Institut d'Electronique fondamentale de l'Université Paris Sud, ENS Cachan, Université Joseph Fourier, INP de Grenoble, ESIEE.

Grands groupes

Les principaux groupes français dans le champ de la nanoélectronique sont : STMicroelectronics, Thalès, Alcatel Lucent, Gemalto.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

SOITEC, ALTIS, Trixell.

Start-up et PME

La France possède un écosystème de start-up et de PME dans le domaine de la nanoélectronique qui couvre l'ensemble de la chaîne de valeur : Riber, Semco Engineering, IBS, Magillem Design Services, Docea Power, Tronics Microsystems, Kalray, MicrooLed, Tiempo, Isorg, Primo 1D, Exagan, Vesta System, etc.

Organismes de soutien et d'interface

Ces entreprises sont soutenues et accompagnées par des structures de l'écosystème de l'innovation : Minalogic, SCS, S2E2, IRT Nanoelec, CAPTRONIC, C'Nano Paca (centre de compétences en nanosciences et nanotechnologies), Fondation Nanosciences (réseau thématique de recherche avancée).

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Acteurs clés :

Entreprises	Alcatel Thalès III-V Lab, Alcatel-Lucent, Alstom Hydro Power, Bouygues Construction, EDF, Electropôle - Schneider Electric, Enerbee, Exagan, Gemalto, Genel, Isorg, Kalray, MicrooLed, Mirsense, Primo 1D, PV Alliance, Radiall, Soitec, STMicroelectronics, Thales Research and Technology, Tiempo, Trixell, Tronics Microsystems, Vesta System ...
IRT, ITE, IHU	IRT NanoElec...
Instituts Carnot	CEA LETI, INRIA, LAAS CNRS ...
Autres centres de recherches	ENS Cachan - Département électronique électrotechnique automatique (EEA), Institut d'Electronique fondamentale de l'Université Paris Sud, IEMN Lille, Grenoble INP, LPN, MINATEC, NEEL Université Joseph Fourier - Master EEATS...
Pôles de compétitivité	Minalogic...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	C'Nano PACA, Fondation Nanosciences, Optic Rhône Alpes...

47

Technologies de conception de contenus et d'expériences

LOISIRS & CULTURE

Énergie,
Mobilité,
Numérique

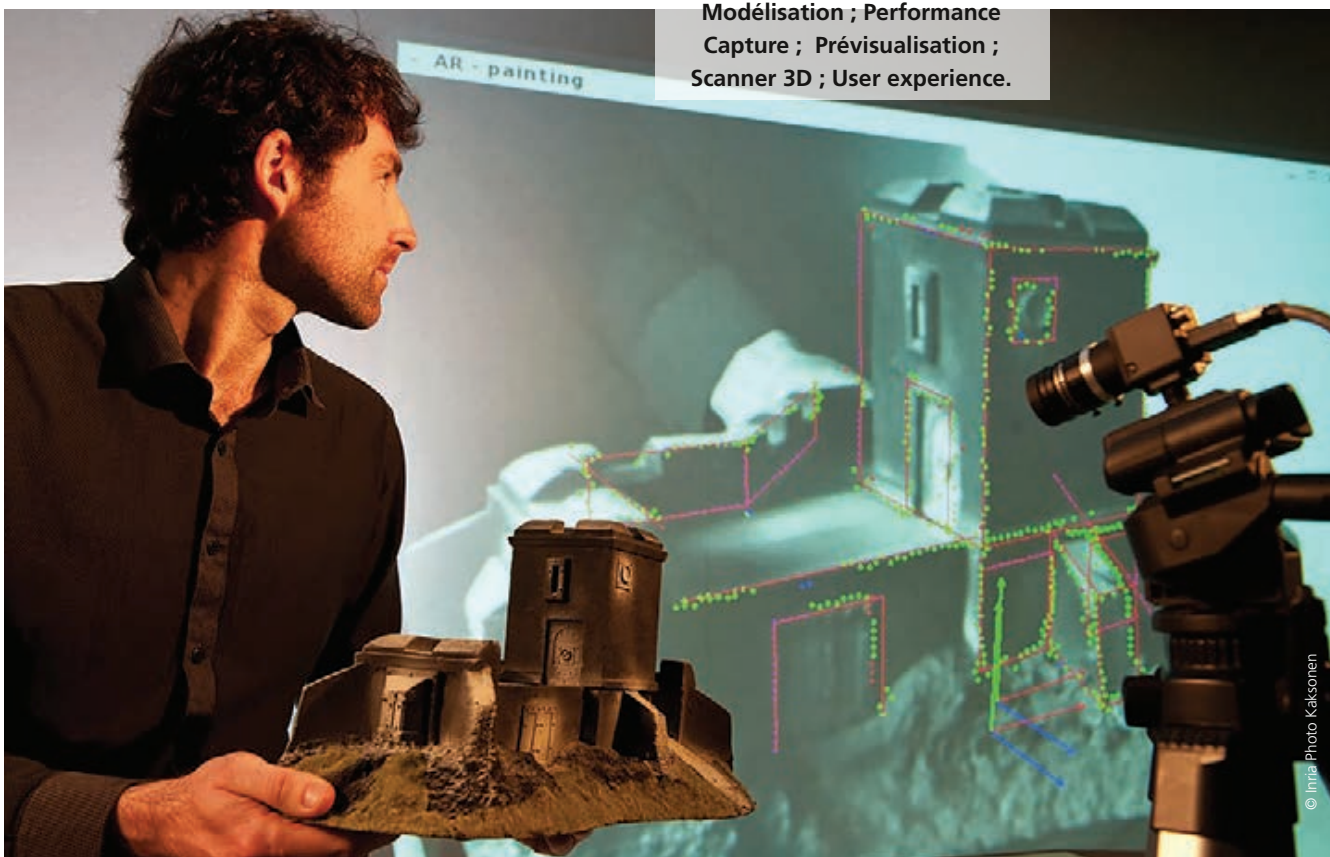
Environnement, Habitat,
Santé et bien-être, Sécurité

Alimentation

► Correspond à
une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

Génération procédurale ; Interfaces
utilisateurs ; Motion Capture ;
Moteur de rendu en temps réel ;
Modélisation ; Performance
Capture ; Prévisualisation ;
Scanner 3D ; User experience.



© Inria Photo Kaksoren

Définition et périmètre

La production de contenus concerne à la fois l'audio-visuel (cinéma, télévision, radio, web), les multimédias (jeux vidéo, web) et l'édition textuelle et numérique. Les technologies de conception de contenus et d'expériences intègrent l'ensemble des technologies de conception des industries créatives et culturelles (ICC). Cela concerne donc la production d'image et de son, les interfaces utilisateurs. Ces technologies sont également mises à profit dans d'autres secteurs tels que l'architecture ou la conception industrielle qui ne seront pas abordés ici. Plusieurs technologies ont été identifiées comme clés parmi ces technologies de production de contenu :

■ La captation de mouvement (Motion Capture)

qui consiste à enregistrer les positions et rotations d'objets ou de membres d'êtres vivants, pour en contrôler une contrepartie virtuelle sur ordinateur. Cette technique utilise un capteur relié à une application serveur qui extrait, traite et stocke les données brutes matérielles pour les traiter (filtrage, calculs géométriques et d'interpolation). Ces données peuvent être transmises en temps réel à un logiciel de visualisation, le plus répandue étant MOTIONBUILDER. La captation de mouvement peut être réalisée avec des marqueurs : exosquelette dans le cas des capteurs mécaniques, marqueurs passifs réfléchissants associés à des caméras infrarouges ou cellules photosensibles associées à des micro-LED pour la capture optique et bobines électriques pour la capture magnétique. Les technologies de capture de mouvements s'orientent progressivement vers des solutions sans marqueurs qui permettront de capturer le mouvement sans aucun marqueur ni préparation comme la technologie Kinect. Ces solutions permettent une baisse du coût de production et une plus grande souplesse au niveau de l'utilisation.

■ **La performance capture** est une évolution de la capture de mouvement qui permet une reconstitution plus réaliste des mouvements comme les expressions faciales ou les mouvements des mains.

■ **Le scanner tridimensionnel** est un appareil capable de collecter des données sur la forme et l'apparence (couleur, texture, ..) des objets et de construire à partir de ces données des images de synthèse en trois dimensions. Le marché des scanners 3D est dominé par les scanners à laser en raison de leur efficacité et

de leur meilleure portabilité mais les segments des scanners optiques et à lumière structurée devraient progresser rapidement.

■ Les moteurs de rendu et le recours au ray-tracing associé au calcul par GPU.

Dans chaque jeu vidéo, il y a un moteur qui effectue les calculs nécessaires au bon déroulement du jeu grâce à de multiples composants logiciels. Le moteur de jeu intègre plusieurs fonctionnalités : le moteur de rendu est responsable de l'affichage des graphismes et doit apporter une texture et du réalisme à travers la simulation de lumière ou de fluides, le moteur physique détecte et gère les collisions et les propriétés physiques des objets, le moteur audio prend en charge le son... Les moteurs de jeu deviennent des environnements de développement complets spécialisés dans la création de mondes interactifs en 3D. Les deux moteurs les plus utilisés sont Unity Pro (UNITY TECHNOLOGIES) et Unreal (EPIC GAMES)¹. Les moteurs de rendu 3D utilisent deux techniques pour créer des images 3D : la rasterisation et le lancer de rayon (ray tracing). Le ray tracing est une technique de calcul d'optique par ordinateur, consistant à simuler le parcours inverse de la lumière. En vision naturelle, les rayons sont émis depuis une source lumineuse, réfléchis par les objets et une partie de ces rayons arrive sur l'œil. Le ray tracing reconstitue le parcours du rayon de l'œil (caméra) à la source lumineuse afin de ne prendre en compte que les rayons vus par l'œil, ce qui rend les temps de calcul acceptables. Le ray tracing permet d'obtenir des images très réalistes mais le temps de rendu énorme a longtemps limité son utilisation au rendu différé. L'augmentation de la puissance des ordinateurs permet d'envisager d'adapter le ray tracing aux contraintes du rendu temps réel. Le calcul par GPU consiste à utiliser le processeur graphique (GPU) en parallèle du CPU (processeur central) pour accélérer les portions de code les plus lourdes en ressources de calcul. La puissance de traitement parallèle des GPU NVIDIA permet d'accélérer la vitesse de rendu des logiciels et notamment les procédures de calcul de ray tracing².

1 – USINE DIGITALE : « CES 2014 : Unreal, Unity, Valve : trois moteurs de jeux vidéo, trois business models » <<http://www.usine-digitale.fr/editorial/unreal-unity-valve-trois-moteurs-de-jeux-video-trois-business-models.N317270>>

2 – NVIDIA : « Ray-tracing par GPU ». <<http://www.nvidia.fr/object/gpu-ray-tracing-fr.html>>

■ **Les technologies de rendu en temps réel et la prévisualisation.**

La technologie de rendu en temps réel (*real-time rendering*) permet de créer et visualiser des décors virtuels en direct. Les studios se tournent de plus en plus vers des solutions basées sur les moteurs de jeux vidéo comme cryEngine ou Unreal Engine. La prévisualisation est un outil d'assistance à la mise en scène, elle permet au réalisateur de visionner en direct les scènes en assemblant les décors virtuels et les acteurs tournés sur fond vert, sans attendre l'étape de post-production. A l'étape de post production, des logiciels de prévisualisation comme Solid Track permettent de fusionner très rapidement les images filmées et les images de synthèse. Les outils de prévisualisation à l'instar de ceux développés par les studios américains Third Floor et Halon, font appel à l'animation 3D, la performance capture ou encore à l'outil Simulcalm combinés à des logiciels 3D ou à des moteurs de rendu temps réel.

■ **La génération procédurale de contenus** permet de créer des scènes naturelles avec un haut niveau de détails. Le développeur crée un algorithme qui définit les principes de génération des textures, des environnements, du placement des objets et même des niveaux de jeux. L'ordinateur génère alors une infinité d'éléments correspondant à ces normes prédéfinies. La génération procédurale optimise le travail des artistes et permet aussi de mieux gérer les problématiques de stockage.

■ La production de contenus fait également appel à une multitude de **logiciels de modélisation et simulation** perpétuellement en évolution. Les PME françaises sont très actives sur le sujet. 4D VIEW SOLUTIONS, positionnée sur la production de contenu 3D, commercialise un système de modélisation 3D de scènes réelles dynamiques. Il s'agit d'un système calculant une représentation 3D d'une scène filmée par plusieurs caméras synchronisées. GOLAEM a développé un outil d'intelligence artificielle « Golaem Crowd » qui permet de peupler les scènes avec des personnages numériques et de modéliser les mouvements de foules complexes et MOTIONTREE développe des outils de production de contenus interactifs.

Les expériences utilisateurs. Souvent confrontée aux problématiques liées à l'ergonomie, l'expérience utilisateur se voit de plus en plus enrichie grâce aux interfaces immersives et interactives. En particulier l'interface contextuelle, qui anticipe les besoins

de l'utilisateur en fonction de ses habitudes et du contexte analysé par les différents capteurs du téléphone, est un axe de développement fort. AVIATE, la start-up rachetée par YAHOO³ propose un écran d'accueil contextuel avec des groupes d'applications susceptibles d'être utilisées en fonction de l'heure, du lieu, de l'agenda, du mouvement du mobile, etc. Un glissement de l'écran vers le bas permet d'afficher des éléments en lien comme les critiques du restaurant où vous êtes ou les horaires des bus qui passent à proximité. Cette tendance est également visible chez GOOGLE avec GOOGLE NOW, chez FACEBOOK avec HOME et chez MICROSOFT. Les interfaces utilisateurs utilisent également les technologies de réalité augmentée notamment sur les sites d'e-commerce pour essayer l'article avant l'achat à l'instar de MODE-IN-MOTION, une PME qui propose d'essayer virtuellement une montre aussi simplement qu'en boutique⁴. L'interface utilisateur n'est qu'une composante de l'expérience utilisateur qui prend en compte l'ensemble du ressenti de l'utilisateur au cours de son utilisation d'un produit.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

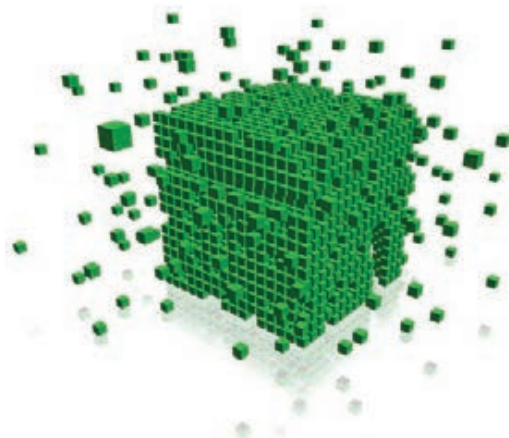
■ Une dimension sociétale forte

Indépendamment des technologies présentées dans ce document et de leur apport au niveau de la narration et de l'expérience utilisateur, il est ici important de préciser l'importance sociétale de ces technologies. En premier lieu, la France est un des pays leaders de ce secteur en termes économiques et d'influence : créativité, nouvelles formes de narration, expériences utilisateurs apportées par les entreprises françaises sont très souvent mises en avant. Ingénieurs, développeurs et créatifs français font référence au niveau mondial et contribuent aussi à donner une autre dimension aux contenus développés par eux. Ils donnent du sens à la narration, placent le spectateur au cœur de l'action et contribuent à des contenus de grande qualité.

3 – USINE DIGITALE : « CES 2014 : Yahoo! s'offre Aviate et son interface mobile contextuelle ». < <http://www.usine-digitale.fr/article/ces-2014-yahoo-s-offre-aviate-et-son-interface-mobile-contextuelle.N230618> >

4 – USINE DIGITALE : « CES 2014 : Le site Mode-In-Motion permet d'essayer des montres en 3D ». < <http://www.usine-digitale.fr/article/le-site-mode-in-motion-permet-d-essayer-des-montres-en-3d.N315962> >

■ **Des technologies de conception renouvelées par l'explosion du Big Data, du calcul intensif et de l'intelligence artificielle**



© Fotolia

L'explosion des données massives couplée au calcul haute performance avec l'utilisation de calculateurs puissants rend possible le développement spectaculaire des performances des applications logicielles. L'application de ces solutions au secteur Loisirs et culture permet une meilleure analyse des données disponibles pour renouveler l'expérience utilisateur. Le développement de l'IA et du Big Data devrait également encourager le développement de la génération procédurale de contenu à l'instar de VWorldTerrain®, une technologie procédurale de rendu de terrain 3D temps-réel, combinée à des données satellite massives, capable de recréer des paysages réalistes avec une grande précision topographique, une végétation adéquate, une météo dynamique et une gestion du temps. Du point de vue joueur, la génération procédurale favorise la rejouabilité quasi-infinie en proposant des parties différentes et contribue à renouveler l'expérience utilisateur. Lors du développement, la génération procédurale permet de réduire les coûts de main d'œuvre et de diminuer les besoins en bande passante et en stockage. Michael Cook a ainsi mis au point Angelina, une intelligence artificielle, capable de créer des jeux, une fois que les règles ont été générées, choisissant le thème, les couleurs, les musiques et en produisant les objets.

■ **Le cinéma, l'audiovisuel et les jeux vidéo, des secteurs générateurs de revenus qui néces-**

sitent d'intégrer les dernières technologies pour renouveler l'expérience utilisateur

Dans le secteur des loisirs et culture, le cinéma et les jeux vidéo sont les premiers à se positionner sur les nouvelles technologies de conception pour faire évoluer l'expérience de l'utilisateur. Selon l'étude du cabinet BIPE, les secteurs du cinéma, de l'audiovisuel, des jeux vidéo et de la vidéo représentent une part du PIB français comparable à celui de la construction automobile et supérieure à celui de l'industrie pharmaceutique avec une valeur ajoutée directe de 8,5 Md € en 2012. Au-delà même des chiffres, l'efficacité de ces secteurs se mesure à la visibilité et à la démocratisation croissante de la culture française en France et dans le monde.

■ **Une « French touch » reconnue à l'international**

La filière est organisée autour de nombreuses PME qui représentent, pour une grande partie d'entre elles, la valeur ajoutée de la création de contenus française. La fameuse « French Touch » existe toujours et les acteurs locaux ont souvent une vision plus novatrice que leurs concurrents américains ou asiatiques. En dépit de la complexité de conception des moteurs interactifs qui conduit la plupart des développeurs à acheter des solutions clé en main, les acteurs français continuent à développer leur propre technologie en interne. La France est le premier pays européen représenté au CES 2015 à Las Vegas et le 5^e au monde après la Chine, les USA, Taiwan et la Corée avec 120 start-ups. Sur le marché de l'animation 3D, une myriade de start-ups françaises se distingue grâce à des briques technologiques qui améliorent la production d'images : modélisation des foules, intégration d'avatars virtuels directement sur un plateau de tournage, doublures numériques afin de faciliter le travail des studios d'animation... Performer, le logiciel de la start-up DYNAMIXYZ facilite l'animation du visage d'avatars virtuels à partir d'expressions filmées sur un modèle réel et transposées à l'avatar grâce à un modèle statistique. SOLIDANIM est le spécialiste de la motion capture, à l'origine de l'outil SolidTrack qui se présente comme un système de tracking de caméra avec aperçu temps réel d'effets visuels. Le secteur français est particulièrement dynamique comme en témoigne le nombre d'entreprises créées : MERCENARIES ENGINEERING, à l'origine d'un nouveau moteur de rendu 3D, solution professionnelle de rendu, de lookdev et d'illumination qui combine flexibilité et réalisme, EISKO (anciennement l'AGENCE DE DOUBLURES NUMÉRIQUES) qui garantit le réalisme d'une doublure numé-

rique dans un film ou un jeu-vidéo. Même si le marché est dominé par AUTODESK, les acteurs français (studios de production d'animation et de jeu vidéo notamment) se sont ménagés une place de choix en développant leurs propres briques technologiques pour optimiser les logiciels du poids lourd du secteur. Ces technologies soutiennent le développement et renforcent la compétitivité des entreprises françaises en permettant d'améliorer la qualité des produits et de diminuer leur coût de production. Si la créativité et l'innovation des acteurs français sont reconnues internationalement, leurs développements techniques répondent autant à des besoins technologiques pointus et spécifiques qu'à une logique économique liée à la croissance forte des coûts de production ainsi qu'à une perte de compétitivité face à la concurrence fiscale de pays étrangers comme le Canada, la Belgique, l'Irlande ou bien encore les pays du sud-est asiatique...

■ **Les technologies de rendu en temps réel au cœur de l'image 3D**

Preuve de l'intérêt de cette technologie pour l'audiovisuel, le congrès du CILECT (Centre International de Liaison des Écoles de Cinéma et de Télévision) en octobre 2014 était axé sur la thématique de la « prévisualisation ». La prévisualisation est un outil

de communication interne à l'équipe qui permet d'agir en direct sur les éléments d'une scène et qui réduit considérablement les coûts de production par rapport aux méthodes traditionnelles de tracking et de compositing. Des entreprises françaises commercialisent déjà des solutions de prévisualisation à l'instar de Studio20 qui propose l'outil Previzion, développé par Lightcraft Technologie. Previzion⁵ permet d'afficher la scène sur fond vert et le décor 3D avec un precompositing en temps réel, puis les scènes sont enregistrées et intégrées dans le processus de post-production classique. Le secteur français s'implique fortement dans cette technologie comme en témoigne Previz⁶, projet collaboratif labellisé par trois pôles (Cap Digital, Imaginove, Images et Réseaux) et soutenu financièrement dans le cadre du programme du Fonds Unifié Interministériel (FUI). Le consortium qui rassemble plusieurs industriels (Technicolor, Ubisoft, SolidAnim, Loumasystems, Polymorph) et des laboratoires (Insa Rennes, CNRS-LIRIS, Gipsa-lab et l'ENS Louis Lumière) a pour objectif la réalisation d'une plate-forme innovante de prévisualisation en temps réel pour la production de contenus à effets spéciaux (VFX). Le rendu 3D et temps réel a donc une importance croissante dans les industries de l'image.

Liens avec d'autres technologies clés

Les technologies clés qui influencent les Technologies de conception de contenus et d'expériences sont :

- 3 Valorisation et intelligence des données massives

- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique

- 5 Internet des objets

- 6 Infrastructures de 5^{ème} génération

- 11 Intelligence artificielle

- 12 Robotique autonome

- 14 Technologies immersives

- 19 Analyse comportementale

Les technologies influencées par les Technologies de conception de contenus et d'expériences sont :

- 2 Capteurs

- 3 Valorisation et intelligence des données massives

- 4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique

- 5 Internet des objets

- 6 Infrastructures de 5^{ème} génération

- 10 Cobotique et humain augmenté

- 12 Robotique autonome

- 14 Technologies immersives

- 19 Analyse comportementale

Les technologies de conception de contenu et d'expérience s'appuient sur des technologies immersives comme le son 3D ou les interfaces haptiques et sur l'intelligence artificielle comme la modélisation comportementale avec la création d'avatars virtuels intelligents. Ces technologies sont traitées dans les fiches correspondantes « Technologies immersives » et « Intelligence artificielle ».

Les marchés

L'essor de ces technologies s'inscrit sur plusieurs marchés du secteur Loisirs et culture :

- Le tourisme avec la génération d'expérience, l'e-tourisme, la traduction automatique, l'amélioration de l'accessibilité au musée ;
- Les industries créatives et culturelles (cinéma, audiovisuel, jeu vidéo) ;
- La formation professionnelle avec le serious game (apprentissage, formation, simulation...)
- La communication (institutionnelle et publicité) et l'évènementiel.

Ces technologies sont beaucoup utilisées par les industries du divertissement comme le cinéma, le jeu vidéo, la documentation d'objets culturels mais se démocratisent dans d'autres secteurs que celui des loisirs. À titre d'exemple, les scanners 3D sont de plus en plus populaires en architecture avec l'apparition de scanners portables qui permettent de préserver et d'archiver de nombreuses pièces de musée et de les mettre en scène dans des musées virtuels. Les scanners 3D servent également à la conception industrielle, au rétro-engineering, à la conception de prothèses, pour le contrôle qualité, ... La « machine vision », technologie qui utilise la capture d'image et l'analyse pour automatiser des tâches d'inspection visuelle, est une tendance forte qui devrait être largement utilisée dans les programmes de recherche dans les industries. Des solutions de capture de mouvement initialement utilisées pour l'industrie de l'image trouvent des applications sur d'autres marchés (biologie, santé, sécurité, habitat ...), hors du périmètre « Loisir et culture ».

Le marché mondial de l'imagerie 3D (modélisation 3D, scan 3D et technologies de rendu 3D) devrait croître

5 – STUDIO20 : « Concept ». < <http://studio20.pro/workflow/> >

6 – Technicolor R&D France : « Previz ». < <http://previz.eu/> >

de 3,01 milliards de dollars en 2013 à 9,82 Md \$ en 2018 avec une part de marché importante pour les technologies de rendu 3D⁷. Le marché mondial du scan 3D est estimé à 2,06 Md \$ en 2013 et devrait approcher les 4,08 Md \$ en 2018⁸. Le marché du scan 3D est par ailleurs tiré par la demande croissante des industries des médias et du divertissement, cette technologie offrant des résultats rapides, efficaces et précis. La croissance des contenus 3D associée aux développements technologiques a conduit au lancement rapide de produits avec des images de haute qualité. La conversion facilitée des nuages de points en données de conception assistée par ordinateur, les prix de plus en plus bas et l'efficacité croissante des logiciels utilisés ont accéléré l'adoption de la numérisation 3D.

Les défis technologiques à relever

Avec la concentration de toutes les applications sur les *smartphones* des « digital natives », les interfaces doivent s'adapter au phénomène de convergence digitale⁹ et proposer des versions iOS et Android à l'instar de Coyote¹⁰. Usagers, producteurs, diffuseurs, développeurs, industriels, sont aujourd'hui à l'étape cruciale de la convergence numérique, née de l'interopérabilité et de l'interconnexion des technologies et des supports, qui pose la problématique de l'adaptation des formats. Il est indispensable aujourd'hui d'être multiplateformes, multi format afin de répondre aux nouveaux usages : le contenu doit être lisible et disponible à tout moment, quel que soit le device utilisé. Les usages et les modes de création de contenus s'en trouvent profondément modifiés. Jusqu'alors, l'utilisateur juxtaposait ses pratiques car la distinction entre médias était bien marquée quant à la nature des contenus. Dans un univers technologique interconnecté, le consommateur passe d'un média à l'autre de manière transparente pour y trouver le même type de biens et de services informationnels

7 – MARKETANDMARKETS. « 3D Imaging Market [3D Modeling; 3D Scanning; 3D rendering; Layout and Animation; Image Reconstruction] : Global Advancements, Market Forecasts and Analysis (2013 - 2018) ». <<http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-imaging-market-998.html>>

8 – MARKETANDMARKETS : « 3D Scanning Market ». <<http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/3d-scanning.asp>>

9 – JENKINS H., 2006 : *Convergence Culture, where old and new media collide*, New York, New York University Press, 368p.

10 – USINE DIGITALE. « Le casse-tête du design de l'interface du Coyote S, l'avertisseur avec caméra embarquée ». <<http://www.usine-digitale.fr/article/le-casse-tete-du-design-de-l-interface-du-coyote-s-l-avertisseur-avec-camera-embarquee.N295002>>

désormais libérés des contraintes liées au support technique (mobile, tablette, etc.). La convergence technologique va donc peu à peu conduire à la convergence culturelle entre anciens et nouveaux médias.

■ **L'implémentation des nouvelles technologies comme le PBR pour des moteurs de jeu toujours plus performants**

Les moteurs de jeux sont en constante évolution et doivent s'adapter à l'évolution des jeux vidéo en prenant en charge les jeux de réalité virtuelle conçus pour l'Oculus Rift et en intégrant la possibilité de gérer du code entre plusieurs utilisateurs et appareils (sur un mode collaboratif) comme la dernière version d'Unity Pro. Ainsi le PBR (Physically Based rendering) existe depuis près de dix ans mais a été assez peu utilisé. Il s'agit d'un standard d'équations qui reproduisent plus fidèlement la lumière dans les jeux vidéo, en prenant en compte l'environnement qui entoure les objets. Avec ce nouvel outil sur lequel reposent tous les graphismes d'un moteur 3D, les reflets sur les matières sont donc beaucoup plus naturels. Avec la recherche de l'hyper-réalisme cette technologie devrait connaître des développements importants dans les années à venir.

■ **Gérer l'intégration de la génération procédurale dans la conception des jeux vidéo**

La génération procédurale expose le jeu au risque de présenter des bugs ou des niveaux de jeux incohérents malgré l'utilisation d'algorithmes de tests pour vérifier la faisabilité des niveaux. À l'heure actuelle, les ordinateurs ne sont pas capables de prendre en charge un monde de jeu vidéo infini ce qui implique de choisir de façon pertinente certaines parties du jeu uniquement qui feront appel à de la génération procédurale.

■ **Améliorer la précision de la capture 3D**

La capture 3D est confrontée à des problématiques de taux d'erreur et de degré de précision qui nécessitent un affinage et un recadrage des images via des logiciels adaptés. Ces problématiques de précision sont en partie imputables à la stabilité des drones qui devra être renforcée pour augmenter les performances du scan 3D notamment.

■ **Les défis des technologies de rendu temps réel**

Selon un talk de Johan Andersson à l'occasion du Siggraph 2012, les défis pour les technologies de rendu temps réel pour les dix ans à venir concernent l'amélioration des images pour parvenir à une qualité

cinématographique, la gestion de la lumière, la programmabilité des pipelines graphiques des GPU, la réduction des coûts de production et la mise à l'échelle 3D des objets (détail, résolution et puissance). L'amélioration des images passe par des progrès au niveau des GPU sur l'antirénelage, le flou cinétique et le flou d'arrière-plan, le rendu de la transparence. Des progrès restent à faire pour la représentation de matériaux mous et des liquides. En ce qui concerne la lumière, les axes de perfectionnement concernent le rendu des ombres, des reflets et l'illumination dynamique globale. L'intégration croissante du PBR (Physically Based Rendering) dans les moteurs de jeux contribue à reproduire plus fidèlement la lumière dans les jeux vidéo, en prenant compte l'environnement qui entoure les objets. La diminution des coûts de production implique de réduire le temps passé sur la conception du contenu des jeux vidéo en utilisant notamment la génération procédurale pour la texture, la géométrie...

■ **Les mécanismes cognitifs**

L'ensemble des « outils » qui permettent de développer la connaissance (attention, conscience, mémoire, émotion, actions,...) fait l'objet de recherches importantes notamment au sein du laboratoire EMC à Lyon. À l'avenir, il devrait s'agir d'intégrer en plus du design fonctionnel et des images de plus en plus réalistes, le design émotionnel qui sert à transmettre de l'humanité, de la proximité, de l'empathie dans les interfaces. Si la mise en œuvre et les applications marché ne sont pas encore opérationnelles, gageons que leur intégration, notamment dans le traitement de l'information, aura des effets importants sur les expériences utilisateurs des prochaines années.

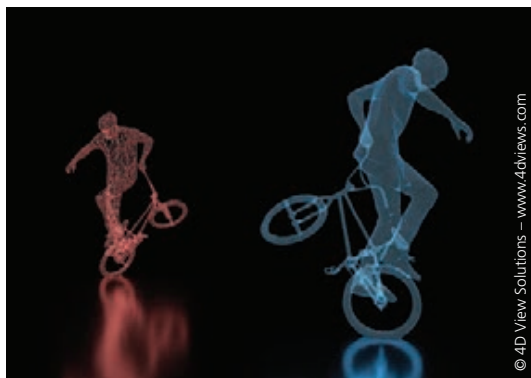
■ **La gestion de la volumétrie des données**

La croissance exponentielle des données liée aux technologies de conception de contenu (rendu temps réel, données 3D, modélisation et simulation, capture 3D...) implique un véritable changement d'échelle dans les volumes de données et la complexité des calculs. Il est donc nécessaire de repenser la façon de capturer, stocker et récupérer les données pour qu'elles servent à créer plus de valeur. Que ce soit pour des plateformes de jeu de plus en plus complexes ou bien la qualité croissante des images calculées dans le cinéma d'animation (données 3D, texture, lumière...), la gestion et la manipulation des données produites sont fondamentales pour les prochaines générations de productions. Travailler de manière connectée à plusieurs personnes en même temps depuis plusieurs sites ou bien réutiliser les

données pour différentes productions sont des atouts majeurs de productivité et de souplesse permettant une allocation dynamique des tâches de production.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

■ Une intégration des technologies qui doit convaincre les consommateurs via l'expérience utilisateur



Un des défis commerciaux, notamment pour les éditeurs, devrait consister à traduire l'apport des nouvelles technologies (UHD, 3D,...) en valeur ajoutée perceptible par le consommateur lors de l'expérience utilisateur. Ceci est d'autant plus vrai pour des technologies exigeantes, employées dans des jeux à gros budget, qui doivent trouver un marché suffisant pour amortir les frais de conception.

■ Développer des outils technologiques pour l'international

La tendance actuelle est à l'utilisation de briques logicielles commerciales, ce qui a pour effet de faire émerger quelques outils dominants. Les entreprises françaises doivent se saisir de cette opportunité pour valoriser commercialement leurs technologies internes, souvent performantes, créer des effets de volume et rivaliser avec les plus gros acteurs du marché de la technologie des contenus. Les projets HD3D et PlayAll, même s'ils n'ont pas abouti à des solutions commerciales doivent servir d'exemples pour tenter de créer des outils collaboratifs de production de contenu de haut niveau, correspondant aux standards français de la création. Si les créateurs français font l'objet de propositions étrangères intéressantes, les ingénieurs français sont aussi très reconnus à l'étranger. De ce fait, les outils technologiques « made in France » pourraient connaître un succès à

l'international. Ces opportunités d'ouverture de marché doivent être prises en compte par les acteurs français.

■ Intégration de la génération procédurale dans la conception des jeux vidéo : conservation de l'expérience utilisateur et acceptation par le consommateur

Le défi de la génération procédurale pour le développeur consiste à générer un monde intéressant et varié, en évitant d'être trop répétitif. L'approche procédurale implique de repenser la durée de vie du jeu qui dépend davantage de la propension du joueur à se lasser que de l'imagination du développeur. Par ailleurs, les studios de production de jeux doivent s'approprier cette technique de génération procédurale et l'exploiter aux bons moments à l'intérieur du jeu pour conserver l'expérience utilisateur. Une fois cet équilibre trouvé, le défi commercial devrait résider dans l'acceptation par le consommateur de mondes qui n'ont pas été désignés à la main, susceptibles d'avoir moins de cohérence.

Les enjeux réglementaires

■ Réglementation fiscale

Si nos éditeurs, distributeurs et producteurs nationaux s'accommodent mal de l'arrivée sur le marché d'acteurs globaux dont les sièges sont implantés à l'étranger et qui parviennent ainsi à se soustraire aux règles françaises, notamment fiscales, c'est aussi le cas de nos industries techniques. Ainsi le Canada a mis en place un crédit d'impôt dédié aux effets spéciaux particulièrement efficace qui vient concurrencer fortement nos meilleurs spécialistes. Par ailleurs, une étude du CNC de 2014 qui portait sur les dispositifs fiscaux d'aide au cinéma et à l'audiovisuel dans sept pays montrait que « Comparé aux sept dispositifs étudiés, [le français] est le moins attractif sur des critères purement financiers [...] et le plus contraignant ».

Le temps de la réglementation est beaucoup plus lent que celui de l'innovation numérique, qui n'a jamais été aussi rapide et touche largement le secteur culturel, ce qui rend l'exercice réglementaire tel que nous le connaissons de plus en plus complexe et incertain.

■ Droits d'auteurs et droit à l'image

Avec le développement des technologies de type Scan 3D et de prises de vues *via* drones, il est important là aussi de respecter les droits des auteurs, qu'ils soient architectes ou créatifs au moment de réutiliser leurs œuvres à d'autres fins que l'objet initial.

Analyse AFOM

ATOUTS

Image de marque de la France,
Le poids du cinéma français en production et au box-office (1^{er} européen).
La place des acteurs du jeu vidéo, souvent à la pointe en matière de technologies et de contenus.
3^{ème} producteur mondial d'animation, derrière les États-Unis et le Japon et plus de 40 % du marché de l'animation en Europe.
Formation d'excellence reconnue (Écoles, Universités)
Des laboratoires performants
Plusieurs leaders

FAIBLESSES

Manque de transferts de technologies depuis les laboratoires
Des projets s'inscrivant dans le temps long
Un secteur cyclique
Des entreprises technologiques qui n'ont pas toujours atteint la taille critique face à des acteurs de poids (Adobe, 3DSMax, Disney, etc.)

OPPORTUNITÉS

La culture européenne : les Anglo-Saxons ne savent pas l'appréhender. Cette forte coloration culturelle peut également être une faiblesse pour adresser de nouveaux marchés.
Des technologies diffusables (génération procédurale, modélisation, simulation, expérience utilisateur...) vers d'autres secteurs (santé, habitat, sécurité, environnement, urbanisme...).

MENACES

Un marché européen fragmenté : ce qui représente un verrou pour les autres mais également pour la France
Les acteurs français doivent suivre l'exemple des entreprises étrangères et s'intéresser aux marchés américain et chinois, plus friands de ces technologies, pour des raisons culturelles et financières.
Fort risque de délocalisation : dumping fiscal et production à bas coût dans les pays émergents

Facteurs clés de succès et recommandations

■ Aides publiques et standards ouverts

Pour aider au développement d'outils technologiques de haut niveau et en faciliter l'accès au plus grand nombre, il pourrait être utile de conditionner certaines aides publiques à l'utilisation de standards ouverts et donc accessibles aux autres acteurs. Au travers d'une telle mesure, il s'agit aussi de promouvoir

l'interopérabilité des technologies, des terminaux, des fichiers et des droits numériques.

■ Favoriser le rapprochement d'acteurs développant des outils quasiment identiques

En complément de la recommandation ci-dessus, il semble nécessaire de favoriser le rapprochement

d'acteurs, afin d'obtenir une taille critique en phase avec le marché mondial. On met alors en commun des outils, des compétences et des clients au service d'une force de frappe permettant à terme de concurrencer les acteurs mondiaux qui monopolisent ce marché.

■ Développer la visibilité des acteurs à l'international

Les entreprises françaises présentes sur le secteur des outils de création de contenu sont souvent de petites sociétés qui doivent pouvoir avoir accès rapidement à un marché mondial. Renforcer la visibilité de ces acteurs comme par exemple le stand « France Numérique » au Siggraph initiée tous les ans par les 3 pôles de compétitivité Cap Digital, Imaginove et Images & Réseaux, permettra de nouer des partenariats, conquérir de nouveaux marchés et générer rapidement du chiffre d'affaires. Si la taille n'est pas toujours un atout, la visibilité internationale est primordiale (salons, festivals) pour exister sur ce marché mondial.

■ Conserver l'avance technologique et s'ouvrir à d'autres marchés

Les start-ups françaises doivent conserver leur avance technologique car si « les grands studios sont toujours prêts à tester des outils et à les acheter s'ils sont meilleurs que la concurrence », les fournisseurs sont immédiatement remplacés s'ils perdent leur longueur d'avance » selon Renaud Séguier, co-fondateurs de Dynamixyz. Les jeunes start-up peuvent s'ouvrir à d'autres marchés par le biais des projets collaboratifs, encouragés par les pôles de compétitivité, afin d'externaliser l'effort de recherche.

En parallèle, il faut élargir la définition de l'innovation au-delà de la seule R&D technologique : usage, design, modèles économiques, accessibilité... L'innovation se développant par définition dans un contexte d'incertitude, les projets culturels innovants doivent être éclairés par les travaux en cours dans l'univers de la recherche, sur les aspects technologiques mais également sociologiques et

comportementaux (économie de la contribution, analyse comportementale, etc.). Il faut promouvoir une « innovation par la cible », prenant d'avantage en compte les besoins de l'utilisateur.

■ Encourager la standardisation

À l'exception des organismes de recherche (Cf. par exemple le fort engagement de l'INRIA au W3C), les acteurs français des industries culturelles et créatives sont en général peu investis dans les instances de normalisation issues du monde de l'internet et du web. Si la mobilisation des éditeurs et diffuseurs TV dans le consortium HbbTV a été un signe positif (prise de conscience de la nécessité de s'unir pour promouvoir sa vision, les éléments fondamentaux de sa création de valeur), ce mouvement touche peu d'autres sphères des luttes d'influences mondiales entre acteurs de l'internet. Ces actions devront être amplifiées.

Par ailleurs, le domaine de la production de contenu suit en général des règles propres à chaque maison/studio de production, aux habitudes de travail des réalisateurs et des sous-traitants auxquels il fait appel. Des standards ou des méthodes reconnues devraient trouver leur place au service du coût des productions.

■ Encourager l'utilisation de ces technologies sur le marché européen

■ Adapter le système fiscal pour éviter la délocalisation de la production

Un des enjeux majeur de compétitivité dans ce secteur consistera à éviter la délocalisation de la production audiovisuelle et cinématographique française vers la Belgique, le Luxembourg, le Canada... en raison notamment des avantages fiscaux et sociaux et de l'internalisation des fonctions de post-production par les agences. Les coûts de production de jeux vidéo sont de plus en plus élevés en raison du recours à des technologies de pointe et constituent une forte barrière à l'entrée. L'édition rencontre les mêmes problématiques de coûts pour la production de livre numérique.

Acteurs clés :

Entreprises	3DEXPERIENCE Platform - Dassault système, 4D View Solutions, Allegorithmic, Dassault Systemes, Dynamixyz, Eisko, Golaem, ISKN, MacGuff, Mercenaries Engineering, MIKROS Images, Motiontree, Novamotion, Quantic Dream, SolidAnim, Technicolor, Ubisoft, Voxygen...
IRT, ITE, IHU	B-COM, SystemX...
Instituts Carnot	CEA LIST, INRIA, LAAS CNRS...
Autres centres de recherches	Ecole des Gobelins, ENJMIN, Stratecollege...
Pôles de compétitivité	CapDigital, Images et Réseaux, Imaginove, Systematic...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	CITIA, Magelis, PARIS ACM SIGGRAPH, Pictanovo, Primi...

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale	
En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale	
En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

ANNUAIRE

ALSACE

Fibre Energivie

Pôle de compétitivité
03 29 29 61 89
contact@polefibres.fr
http://www.pole.energievie.eu/fr/
formulaire/contact
6 Rue Oberlin, 67000 Strasbourg
Technologies clés : 38, 39, 40, 41, 42

Véhicule du futur

Pôle de compétitivité
03 89 32 76 44
Maison du Technopole - CS 52118,
40 rue Marc Seguin 68060
MULHOUSE Cedex
Technologies clés : 10, 12, 20, 45

Alsace Biovalley

Pôle de compétitivité
03 90 40 30 00
testez@alsace-biovalley.com
550 Boulevard Gonther d'Andernach,
Parc innovation 67400 Illkirch-
Graffenstaden
Technologies clés : 14, 15, 26

BeAM

Spi-off de l'Irepa
Entreprise
03 88 65 54 13
contact@beam-machines.com
Pôle API - Parc d'Innovation F-67400
ILLKIRCH
Technologies clés : 9, 43

Cellprothera

Entreprise
03 69 71 97 71
http://www.cellprothera.com/
contact-2/
12, Rue du Parc 68100 Mulhouse
Technologies clés : 26, 29

MICA

Institut Carnot
03 89 60 87 04
contact@carnot-mica.fr
15 rue Jean Starcky - BP 2488 -
68057 Mulhouse cedex
Technologies clés : 1, 9

CEED

Centre Européen d'Étude du Diabète
Académique
03 90 20 12 12
association@ceed-diabete.org
Boulevard René Leriche 67200
STRASBOURG
Technologies clés : 13

Eiffage-Clemessy

Entreprise
03 89 32 32 32
clemessy.groupe@clemessy.fr
18 rue de Thann, BP 52499, 68 057
MULHOUSE CEDEX 2
Technologies clés : 42

IHU MIX-Surg

Institut de Chirurgie Guidée par
l'Image de Strasbourg
IHU
03 88 11 90 00
http://www.ihu-strasbourg.eu/ihu/
contact/
IHU Strasbourg - S/c IRCAD - 1,
place de l'Hôpital 67091 Strasbourg
Cedex, France
Technologies clés : 14

IPCMS

Institut de Physique et de Chimie de
Strasbourg
Académique
03 88 10 70 00
ipcms@ipcms.unistra.fr
23 Rue du Loess STRASBOURG
67034
Technologies clés : 42

Ircad

Institut de Recherche contre les
Cancers de l'Appareil Digestif
Académique
03 88 11 90 00
http://www.ircad.fr/fr/nous-
contacter/
IRCAD/EITS - Hôpitaux Universitaires
- 1, place de l'Hôpital - 67091

Strasbourg Cedex
Technologies clés : 14

Irepa Laser

Entreprise
03 88 65 54 00
Parc d'Innovation 67 400 Illkirch
Technologies clés : 9

IS2M (Mulhouse)

Institut de Science des Matériaux de
Mulhouse
Académique
03 89 60 87 00
15, rue Jean Starcky - BP 2488 -
68057 Mulhouse cedex
Technologies clés : 23

ITAI Aériat

ITAI
03 88 19 15 15
aerial@aerial-crt.com
250 Rue Laurent Fries - Parc
d'Innovation - CS 40443 - 67412
Illkirch Cedex
Technologies clés : 28

Krinner

Entreprise
03 88 71 48 56
contact@krinner.fr
18 rue du baron Chouard F-67700
Monswiller
Technologies clés : 42

PCE Instrument

Entreprise
09 72 35 37 17
info@pce-france.f
76, Rue de la Plaine des Bouchers
67100 Strasbourg
Technologies clés : 36

Procal FS2I

Entreprise
03 90 20 22 06
http://www.procal.fr/fr/contact
Parc Club des Tanneries 2 rue
de la faisanderie 67200 Lingolsheim
Technologies clés : 38

Proteogenix

Entreprise
03 90 20 54 70
contact@proteogenix.fr
15 rue de la Haye 67300
Schiltigheim
Technologies clés : 15

Pyrum Innovations

Start-up
03 88 34 44 13
contact@pyrum.net
279 route de La Wantzenau 67000
Strasbourg
Technologies clés : 15

Rhenovia Pharma

Entreprise
03 89 32 11 80
info@rhenovia.com
Technopole - Mer Rouge Plaza, 20C
rue de Chemnitz 68200 Mulhouse
Cedex
Technologies clés : 4

Sappel

Entreprise
03 89 69 54 00
67 Rue du Rhône, 68300 Saint-Louis
Technologies clés : 35

Transgene

Entreprise
03 88 27 91 00
communication@transgene.fr
400 Boulevard Gonther d'Andernach
- Parc d'Innovation - CS80166 -
67405 Illkirch Graffenstaden Cedex
Technologies clés : 26

Tryba

Entreprise
03 88 80 29 29
http://www.tryba.com/fr/contact
Zl Le Moulin - 67110
GUNDERSHOFFEN
Technologies clés : 38

Voltec Solar

Entreprise
03 88 49 49 84

info@voltec-solar.com
1, rue des Prés F-67190 DINSHEIM
SUR BRUCHE
Technologies clés : 42

BPI Alsace

BPI
03 88 56 88 56
http://contact.bpifrance.fr/#
3, rue de Berne 67300 Schiltigheim
Technologies clés :

Conectus

SATT
03 68 41 12 60
info@satt.conectus.fr
Parc d'Innovation
650 boulevard Gonther
d'Andernach
67400 Illkirch
Technologies clés :

SEMIA

Incubateur
03 68 85 30 30
g.grand@semia-incal.com
4 rue Boussingault
67000 Strasbourg
Technologies clés :

Euroclima

Entreprise
03 88 50 43 38
http://www.euroclima.fr/contact_
euroclima.php
AMELEC Sarl
37, av de la gare
67560 ROSHEIM
Technologies clés : 40

DIRECCTE Alsace

DIRECCTE
03 88 14 32 08
alsace-polec@directcte.gouv.fr
http://www.alsace.directcte.gouv.fr/
accueil-27
Pôle C, immeuble l'Avancée, 26C Bd
du président Wilson BP 54
Technologies clés :

AQUITAINE

Total

Entreprise
R&D
01 47 44 45 46
http://www.total.com/fr/formulaire-
de-contact
Pôle d'études et de Recherche de
Lacq (PERL), Total E&P
64170 Lacq
Technologies clés : 15, 21, 24

Fonroche Energie

Entreprise
05 53 77 21 31
http://www.fonroche.fr/fr/contact
Zac des champs de Lescaze 47310
ROQUEFORT
Technologies clés : 24, 40, 42

Total

Entreprise
05 59 83 40 00
http://www.total.com/fr/formulaire-
de-contact
Avenue Larribau
64000 Pau
Technologies clés : 15, 21, 22

Exosun

Entreprise
05 56 64 09 24
info@exosun.net
Rue Jacques Monod, Technopole
Bordeaux Montesquieu 33650
Martillac
Technologies clés : 40, 42

ICMBC

Institut de Chimie de la Matière
Condensée de Bordeaux
Académique
05 40 00 26 50
http://www.icmcb-bordeaux.cnrs.
fr/sip.php?page=auteur&id_
auteur=2&lang=fr
87 Avenue du Dr Albert Schweitzer,
33600 Pessac
Technologies clés : 23, 42

IHU LIRYC

L'Institut de RYthmologie et
Modélisation Cardiaque
IHU
contact@ihu-liryx.fr
LIRYC- PTIB Site Xavier Arnoz
Avenue du Haut Lévêque 33400
Pessac
Technologies clés : 14, 31

ISiFoR

Institute for the sustainable
engineering of fossil resources
Institut Carnot
05 59 40 77 96
Université de Pau et des Pays de
l'Adour, Présidence, Avenue de
l'Université - BP 576 - 64012 Pau
Technologies clés : 15, 16

Bordeaux Metabolome Platform

Académique
05 57 57 16 83
beatrice.pou-morato@u-bordeaux.fr
Université de Bordeaux
146, rue Léo Saignat, 33076
Bordeaux
Technologies clés : 18

ActionPin

Entreprise
05 58 55 07 00
actionpination-pin.fr
Z.I. de Cazaille - CS 60030 - 40260
CASTETS
Technologies clés : 27

Ademtech

Entreprise
05 57 02 02 01
http://www.ademtech.com/contact.
asp
BioParc BIOGALIEN, Bat C. 1 étage
27 allée Charles DARWIN 33600
PESSAC
Technologies clés : 1

Aetos

Cluster
05 57 26 76 56
jean-marc.grolleau@fr.thalesgroup.
com
25 avenue Gustave Eiffel - F/33608
PESSAC Cedex
Technologies clés : 12

Agri-synergies

Entreprise
05 53 04 59 42
http://www.agrisynergie.com/fr/
content/contact
7 Rue Tourville, 24000 Périgueux
Technologies clés : 27

Bigarren Bizi

Start-up
stephane.peys@bigarrenbizi.com
http://www.nirea-recycling.
net/?page_id=68
ESTIA 2
Technopole Izarbel
64210 BIDART
Technologies clés : 16

Chaux et Enduits de St Astier

Entreprise
05 53 54 11 25
cesa@c-e-s-a.fr
La Jarthe, 24110 Saint-Astier
Technologies clés : 39

CNRS LBM

Laboratoire de Biogenèse
Membranaire
Académique
05 57 12 25 89
UMR 5200 CNRS Université
Bordeaux Segalen, Bâtiment A3
INRA Bordeaux Aquitaine,
11 Avenue Edouard Bourlaux
CS 20032, 33140 Villenave d'Ornon
Technologies clés : 31

DataMedCare

Entreprise
http://datamedcare.com/user/login
16 RUE EUGENE OLIBET
33400 TALENCE
Technologies clés : 33

De Sagosse

Entreprise
05 53 69 36 30

groupe@desangosse.com
"Bonnel" - CS 10005 - 47480 PONT
DU CASSE
Technologies clés : 27

Fermentalg

Entreprise
05 57 25 02 20
http://www.fermentalg.com/
contacts/contacts.html
4 Rue Rivière, 33500 Libourne
Technologies clés : 8

Fly-n-Sense

Entreprise
05 35 54 00 97
25 rue Marcel Issartier, BP 20005,
33702 Mérignac CEDEX
Technologies clés : 2

INEF4

Institut National d'Excellence
Facteur 4
ITE
05 59 03 61 29
contact@inef4.com
67, rue de Mirambeau - 64600
ANGLE
Technologies clés : 38

Inserm - laboratoire « Bio-ingénierie tissulaire » de Bordeaux

Académique
05 57 57 14 88
joelle.amedee@inserm.fr
Université Bordeaux Segalen
146, rue Léo-Saignat
Case 45
33076 BORDEAUX cedex
Technologies clés : 9

IPREM (Pau)

Institut pluridisciplinaire de
recherche sur l'environnement et les
matériaux
Académique
05 40 17 50 00
helene.josse@univ-pau.fr
Technopole Héloparc, 2 avenue du
Président Pierre Angot - 64053 Pau
cedex 09
Technologies clés : 23

ITERG

Institut des Corps Gras
CTI
05 56 36 00 44
http://iterg.com/-contact-
11 rue Gaspard MONGE - parc
industriel Bersol 2 - 33600 PESSAC
Technologies clés : 8

LISA

Lipides pour l'industrie et la Santé
Académique
Institut Carnot
05 56 02 59 62
http://www.lisa-carnot.eu/sip.
php?page=contact
ITERG - 11 Rue Gaspard Monge
- Parc Industriel Bersol 2 - 33600
PESSAC
Technologies clés : 26

Lixol

Entreprise
05 56 54 14 78
lixol@wanadoo.fr
Zone Industrielle -525, Boulevard de
l'Industrie 33260 LA TESTE DE BUCH
Technologies clés : 1

Metabohub

Académique
05 57 12 26 68
contact@metabohub.fr
Centre INRA Bordeaux-Aquitaine
- 71 Av. Edouard Bourlaux - CS
30032 - 33140 Villenave d'Ornon
Technologies clés : 18

Navarra TS - groupe Vinci

Entreprise
05 57 26 69 20
18 Avenue Gustave Eiffel 33600
Pessac
Technologies clés : 37

Plastinov

Entreprise
05 53 64 22 22

plastinov@plastinove.fr
ZAC Marmande Sud 47250
SAMAZAN
Technologies clés : 43

Route des Lasers
Pôle de compétitivité
05 57 01 74 50
contact@routedelasers.com
Pôle Route des Lasers - Institut
d'optique d'Aquitaine - Rue François
Mitterrand - 33400 TALENCE
Technologies clés : 36

Smart Grid Energy
Réseau
05 31 60 01 31
https://www.smartgridenergy.fr/
contact
7 rue de la Palinette
ZA Les Deux Pins - Porte A'
40130 Capbreton
Technologies clés : 22

Solvay - Laboratory of the Future
Entreprise
R&D
05 56 46 47 56
178, avenue du Dr Schweitzer
F-33608 PESSAC
Technologies clés : 18

Sysolia
Cluster
05 56 15 80 06
contact@sysolia.com
6 allée du Doyen Georges Brus
33600 PESSAC
Technologies clés : 42

Vivagro
Entreprise
05 57 78 32 68
Espace France - Bat. C, 4, voie
Romaine, 33610 Canejan
Technologies clés : 27

Xamen
Start-up
09 80 79 59 95
http://www.xamen.fr/index.php/
fr/contact
28, rue des Laurets 64 000 PAU
Technologies clés : 12

Xylofutur
Pôle de compétitivité
05 56 81 54 87
http://xylofutur.fr/contactez-nous/
Campus Bordeaux Sciences Agro, 1
cours du Général de Gaulle - CS 40
201 - 33170 GRADIGNAN
Technologies clés : 39

Aquitaine Science Transfert
SATT
05 56 42 94 85
contact@ast-innovations.com
Centre Condorcet
162, avenue du Docteur Albert
Schweitzer
33600 PESSAC
Technologies clés :

BPI Aquitaine
BPI
05 56 48 46 46
http://contact.bpifrance.fr/#
Immeuble Bordeaux Plaza 1,
place Ravezies - BP 50155 33042
Bordeaux Cedex
Technologies clés :

IRA
Incubateur
05 40 00 33 33
b.greno@incubateur-aquitaine.com
Université Bordeaux I
Domaine du Haut Carré
351 cours de la Libération
33405 Talence cedex
Technologies clés :

Pôle Avenia
Pôle de compétitivité
05 59 84 81 10
http://www.pole-avenia.com/
contact-2/
POLE AVENIA Technopôle Hélioport,
Avenue du Président Pierre Angot,
64053 Pau cedex 09
Technologies clés :

ENSC
École nationale supérieure de
cognitive
Académique
05 57 00 67 00
contact@ensc.fr
109 avenue Roul, CS 40007, 33405
TALENCE CEDEX
Technologies clés : 10

Toray CFE
Toray Carbone Fibre Europe
Entreprise
05 59 60 71 00
http://www.toray-cfe.com/fr/2015-
04-10-20-19-00/nous-contacter.html
Route de Lagor Abidos 64150
Technologies clés :

DIRECCTE Aquitaine
DIRECCTE
05 56 69 27 45
aquit-polec@direccte.gouv.fr
http://www.aquitaine.direccte.gouv.
fr/accueil-2
Pôle C. 118 Cours du Maréchal Juin
TSA 10001
Technologies clés :

AUVERGNE

Céréales Vallée
Pôle de compétitivité
04 73 33 71 90
info@cereales-vallee.org
Biopôle Clermont-Limagne, Rue
Emile Duclaux 63360 Saint-Beauzire
Technologies clés : 26, 27

Limagrain
Entreprise
04 73 63 40 00
http://www.limagrain.com/fr/
contact-limagrain-a-votre-ecoute
Biopôle Clermont-Limagne Rue
Henri Mondor 63360 Saint-Beauzire
Technologies clés : 8, 26

METabolic Explorer
Entreprise
04 73 33 43 00
contact@metabolic-explorer.com
Biopôle Clermont-Limagne 63360
Saint-Beauzire
Technologies clés : 8, 26

Michelin
Entreprise
04 73 32 20 00
http://www.michelin.com/fre/
contacter-michelin
Place des Carmes Déchaux 63040
Clermont-Ferrand Cedex 9
Technologies clés : 6, 25

**Plateforme d'Exploration
du Métabolisme**
Académique
04 73 62 48 12
marc.ferrara@clermont.inra.fr
INRA Site de Theix
63122 SAINT-GENÈS-CHAMPANELLE
Technologies clés : 18

Allegorithmic
Entreprise
04 73 34 70 80
https://www.allegorithmic.com/
31 rue Gonod 63000 Clermont-
Ferrand
Technologies clés : 47

Biobasic Environnement
Entreprise
09 72 29 08 71
info@biobasicenvironnement.com
Biopôle Clermont-Limagne 63360
Saint-Beauzire
Technologies clés : 37

Carbios
Entreprise
04 73 86 51 76
contact@carbios.fr
Biopôle Clermont-Limagne 63360
Saint-Beauzire
Technologies clés : 8

Catopsys
Start-up
09 72 31 86 11
contact@catopsys.com

R&D HEADQUARTER - Plateforme
Technologique de l'ISIMA - Les
Cézeaux - 63170 Aubière, France
Technologies clés : 14

Florepro « Flores protectrices »
RMT
Réseau - Coordination par l'ADIV
soud.christieans@adiv.fr
10 rue Jacqueline-Auriol, ZAC des
Gravanches
63039 Clermont-Ferrand Cedex 2
Technologies clés : 28

**Institut de Recherche
Pharmabiotiques**
Académique
04 71 45 57 69
http://www.pharmabiotic.org/
contact
100 rue de l'Égalité - Locaux
IUT Biologie Appliquée - 15000
AURILLAC
Technologies clés : 28

ITAI ADIV
Agro-Industriel des Filières Viandes
ITAI
04 73 98 53 80
http://www.adiv.fr/include/nous-
contacter.php
10 rue Jacqueline Auriol - ZAC des
Gravanches - 63039 Clermont-
Ferrand Cedex 2
Technologies clés : 28

LASMEA
Laboratoire des Sciences et
Matériaux pour l'Électronique, et
d'Automatique
Académique
lasmea@lasmea.univ-bpclermont.fr
Université Blaise Pascal (Clermont-
Ferrand II)
24 Av des landais
63177 Aubière Cedex
Technologies clés : 2

Neuronax
Entreprise
04 73 44 94 30
CBRV / Faculté de Médecine,
28 Place Henri Dunant, 63000
Clermont-Ferrand
Technologies clés : 29

Phenix System
Entreprise
04 73 33 45 85
http://www.phenix-systems.com/en/
contact-us?sid=18301
Parc Européen d'Entreprises, Rue
Richard Wagner, 63200 Riom
Technologies clés : 9

Polytech Clermont Ferrand
Académique
04 73 40 75 00
Campus universitaire des Cézeaux -
2, av. Blaise Pascal - TSA 60026 - CS
60026 - 63178 AUBIÈRE cedex
Technologies clés : 39

Viaméca
Pôle de compétitivité
04 27 04 50 69
contact@viameca.fr
Parc technologique La Pardieu c/o
Maceo 14 avenue Léonard de Vinci
63000 Clermont-Ferrand
Technologies clés : 9, 10

BPI Auvergne
BPI
04 73 34 49 90
http://contact.bpifrance.fr/#
Parc technologique La Pardieu -
Immeuble Olympe 17bis, allée Alan
Turing 63170 Aubière
Technologies clés :

BUSI
Incubateur
04 73 64 43 57
mrongere@busi.fr
Biopôle Clermont-Limagne
63360 Saint-Beauzire
Technologies clés :

SATT Grand Centre
SATT
04 73 75 89 27

8 Rue Pablo Picasso, 63000
Clermont-Ferrand
Technologies clés :

DIRECCTE Auvergne
DIRECCTE
04 73 43 14 14
auver-polec@direccte.gouv.fr
http://www.auvergne.direccte.gouv.
fr/accueil-19
Pôle C Cité administrative 2 rue
Pélessier Bâtiment P
Technologies clés :

BASSE-NORMANDIE

TES
Transactions Electroniques Sécurisées
Pôle de compétitivité
02 31 53 63 30
contact@pole-tes.com
2 esplanade Anton Philips, Campus
EffiScience 14460 Colombelles
Technologies clés : 2, 4, 7, 13,
20, 34

ENSICAEN
Académique
02 31 53 29 48
delegue.recherche@ensicaen.fr
6, boulevard Maréchal Juin
CS 45053
14050 CAEN cedex 04
Technologies clés : 19, 34

Aten
Structure d'interface
02 31 95 92 92
http://www.pole-aten.fr/contact
CRMA-BN 10-14 rue Claude Bloch
14000 Caen
Technologies clés : 6

Aykw
Start-up
09 50 48 96 47
info@aykw.fr
7 rue Alfred Kastler 14000 CAEN
Technologies clés : 36

GREYC
Groupe de recherche en
informatique, image, automatique
et instrumentation de l'Université
de Caen
Académique
02 31 56 74 86
contact@greyc.fr
Université de Caen Basse-Normandie
- Campus Côte de Nacre, Boulevard
du Maréchal Juin - CS 14032 -
14032 CAEN cedex 5
Technologies clés : 11

ITAI Actalia
ITAI
02 33 06 71 71
130 rue Louise Michel - CS 82109 -
50 009 SAINT-LÔ
Technologies clés : 28

Laboratoire GREYC - ENSICAEN
Académique
02 31 56 74 86
contact@greyc.fr
https://www.greyc.fr/fr/node/10
ENSICAEN
6 Boulevard du Maréchal Juin
CS 45053
14050 CAEN cedex 4
Technologies clés : 34

Laboratoires Standa
Entreprise
02 31 74 54 89
standa@standa-fr.com
68 rue Robert Kaskoreff 14050
Caen
Technologies clés : 28

Maison France Confort
Entreprise
02 33 80 66 66
2, route d'Anciennes - BP 17 - 61001
ALENCON CEDEX
Basse-Normandie
Technologies clés : 38

NUVIA Process
Entreprise
02 33 01 56 80
contact-process@nuvia.fr
ZA la Fosse Yvon - BP 907 - 50449

Beaumont Cedex
Technologies clés : 44

SCNAsolar
Entreprise
02 33 85 15 15
http://www.scnasolar.com/
contactez-nous/
Parc d'activités de Sainte-Anne
61190 TOUROUVRE
Technologies clés : 42

Université de Caen - CIREVE
Centre interdisciplinaire de réalité
virtuelle
Académique
02 31 56 62 38
philippe.fleury@unicaen.fr
Université de Caen Normandie /
Esplanade de la Paix / CS 14032 /
14032 CAEN cedex 5
Technologies clés : 14

BPI Basse-Normandie
BPI
02 31 46 76 76
http://contact.bpifrance.fr/#
616, rue Marie Curie 14200
Hérouville-Saint-Clair
Technologies clés :

Hippolia
Pôle de compétitivité
02 31 94 94 20
http://pole-hippolia.org/le-pole/
nous-contacter/
Pôle Hippolia - La Maison du cheval -
6 avenue du Maréchal Montgomery
14000 CAEN
Technologies clés :

Normandie Incubation
Incubateur
02 31 56 69 32
proton.incubateur@unicaen.fr
Centre d'Innovation Technologique
17 rue Claude Bloch
BP 55027
14076 Caen cedex 5
Technologies clés :

DIRECCTE Basse normandie
DIRECCTE
02 31 46 00
bnorm-polec@direccte.gouv.fr
http://www.basse-normandie.
direccte.gouv.fr/accueil-29
Pôle C 6 rue de Courtonne
Technologies clés :

BOURGOGNE

Vitagora
Pôle de compétitivité
03 80 78 97 91
vitagora@vitagora.com
Maison des Industries Alimentaires
de Bourgogne - 4 Bd Docteur Jean
Veillet - BP 46524 - 21065 DIJON
Cedex
Technologies clés : 2, 28

Bennefficiency
Filiale groupe Elithis
Entreprise
Conseil
03 80 43 52 02
TOUR ELITHIS 1 C BOULEVARD DE
CHAMPAGNE 21000 DIJON
Technologies clés : 40

FranceOLE
Entreprise
03 85 77 98 00
http://www.franceole.com/
contact-2/contact/
100 Allée Hubert Curien 71200 Le
Creusot
Technologies clés : 43

Global Sensing Technologies
Entreprise
03 80 37 17 95
technical@gsensing.eu
14 rue Pierre de Coubertin, 21000
Dijon
Technologies clés : 2

INRA (réseau INDRES)
Académique
xavier.daire@dijon.inra.fr
http://www.dijon.inra.fr/infos/

contact/2469
17 rue Sully 21065 Dijon
Technologies clés : 28

Le2i

Laboratoire Electronique, Informatique et Images
Académique
03 80 39 36 91
dorielle.batis@u-bourgogne.fr
UFR Sciences et Techniques, allée Alain Savary, 21000 Dijon, France
Technologies clés : 14

Pôle Nucléaire de Bourgogne

Pôle de compétitivité
03 85 42 36 90
<http://www.polenucleairebourgogne.fr/contact/>
1 Avenue de Verdun - BP 60190 - 71105 Chalon sur Saône Cedex
Technologies clés : 44

RB3D

Entreprise
03 86 46 92 58
43 avenue de Paris 89470 MONTEAU
Technologies clés : 10

Spartacus 3D

Groupe Farinia
Start-up
06 77 79 06 07
Route des Forges BP 2, F- La Clayette, 71800 France
Technologies clés : 9

BPI Bourgogne

BPI
03 80 78 82 40
<http://contact.bpifrance.fr/#>
13, rue Jean Giono BP 57407 21074 Dijon Cedex
Technologies clés :

PREMICE

Incubateur
03 80 40 33 33
thomas.dupont@premise-bourgogne.com
Maison Régionale de l'Innovation
64A rue Sully
CS 77124
21071 Dijon cedex
Technologies clés :

SATT Grand Est

SATT
03 80 40 34 80
Maison Régionale de l'Innovation – 64 A, rue Sully – CS 77124 – 21071 Dijon Cedex
Technologies clés :

Inpal Industries

Entreprise
04 78 69 63 20
contact@inpal.com
<http://www.inpal.com/fr/Contact-Inpal-Energie.html>
12 Rue des Grahuches, 89100 Sens
Technologies clés : 40

DIRECCTE Bourgogne

DIRECCTE
03 80 76 99 10
bourg-polec@direccte.gouv.fr
<http://www.bourgogne.direccte.gouv.fr/polec>
Pôle C 19 bis-21, Bd Voltaire BP 81110
Technologies clés :

Images et Réseaux

Pôle de compétitivité
02 96 48 31 55
4 rue Ampère, 22300 Lannion
Technologies clés : 3, 4, 6, 7, 11, 13, 14, 22, 34, 47

BRETAGNE

B-COM

IRT
02 56 35 88 00
<http://b-com.com/fr/contact>
ZAC des Champs Blancs 1219 avenue Champs Blancs 35510 Cesson-Sévigné
Technologies clés : 5, 6, 7, 11, 13, 14, 19, 34, 47

Delta Dore

Entreprise
02 99 73 45 17

<http://www.deltadore.fr/services/contact>
Le Vieux Chêne 35270 Bonnemain
Technologies clés : 5, 38, 40

Mensia Technologies

Start-up
02 99 84 72 59
contact@mensiatech.com
BP 97143 Place du Granier
35571 Chantepie Cedex, France
Technologies clés : 29, 31, 33

Artefacto

Entreprise
02 23 46 46 60
<http://www.artefacto-ar.com/contact/>
2, route du Gacé 35 830 Betton
Technologies clés : 5, 14

Dynamixyz

Entreprise
02 99 12 18 01
80 Avenue des Buttes de Coësmes, 35700 Rennes
Technologies clés : 11, 47

Golaem

Entreprise
02 99 27 21 40
contact@golaem.com
Bâtiment Germanium - 80 avenue des Buttes de Coësmes - 35 700 Rennes
Technologies clés : 4, 47

Optinvent

Start-up
02 99 87 10 66
<http://optinvent.com/contact>
80 avenue des Buttes de Coësmes
35700 RENNES
Technologies clés : 5, 14

3D sound Labs

Start-up
01 40 60 75 37
hello@3dsoundlabs.com
<http://3dsoundlabs.com/contact/>
CENTRE D AFFAIRES ALIZES-22 RUE DE LA RIGOURDIERE 35510 CESSON SEVIGNE
Technologies clés : 14

BioArmor

Entreprise
02 96 32 04 33
<http://bioarmor.com/contact/formulaire-contact/>
Zone industrielle de la Gare - 22940 PLAINTEL
Technologies clés : 28

Blue Solutions (ex-BATSCAP)

Appartient au groupe Bolloré
Entreprise
01 46 96 46 73
ODET 29500 ERGUE GABERIC
Technologies clés : 23

CityzenData

Start-up
contact@cityzendata.com
ZONE DE PRAT PIP NORD - 55 Rue Charles Nungesser, 29490 Guipavas
Technologies clés : 3

FEM

France Énergie Marine
ITE
02 98 49 98 69
contact@france-energies-marines.org
15 rue Johannes Kepler - Technopôle Brest Iroise 29200 BREST
Technologies clés : 43

Goëmar

Entreprise
02 99 19 19 19
PARC TECHNOLOGIQUE ATALANTE - CS 41908 SAINT MALO - 35400 SAINT MALO
Technologies clés : 27

Insa de Rennes

Académique
02 23 23 82 00
20 Avenue des Buttes de Coësmes - CS 70839 - F – 35708 Rennes Cedex 7
Technologies clés : 6

Institut d'Electronique et de Télécommunication de Rennes

Académique
02 23 23 69 69
eric.moricet@univ-rennes1.fr
Eric MORICET - Bât: 11C. Pièce: 109 - Université de Rennes 1 - Campus de Beaulieu - 263 Avenue du Général Leclerc - CS 74205 - 35042 RENNES Cedex
Technologies clés : 6

IonWatt

Start-up
06 34 48 29 76
fhr@ionwatt.com
11 ALLEE DE BEAULIEU 35000 RENNES
Technologies clés : 23

IRISA

Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires
Académique
02 99 84 71 00
contact@irisa.fr
Campus universitaire de Beaulieu - 263 Avenue du Général Leclerc - CS 74205 - 35042 RENNES Cedex
Technologies clés : 6

ITAI Adria Développement

ITAI
02 98 10 18 18
adria.developpement@adria.tm.fr
ZA Créach Gwen - 29196 QUIMPER CEDEX
Technologies clés : 28

Laboratoire des Sciences chimiques de Rennes

Académique
02 23 23 38 88
sg-umrcnrs6226__AT__univ-rennes1.fr
Institut des Sciences Chimiques de Rennes - UMR6226 - 263, avenue du Général Leclerc, Campus de Beaulieu - Bâtiment 10B, 35042 Rennes Cedex
Technologies clés : 36

Lacroix Sofrel

Entreprise
02 99 04 89 00
telecontrol@sofrel.com
2, rue du Plessis 35770 Vern-sur-Seiche
Technologies clés : 35

LGCGM

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique - Université Rennes 1/ Insa Rennes
Académique
02 23 23 87 40
Anne.Foutel-Richard@insa-rennes.fr
INSA de Rennes Bât 7 - 20 Avenue des Buttes de Coësmes - CS 70839 - 35708 RENNES Cedex 7
Technologies clés : 39

Nass & Wind

Entreprise
02 97 37 56 06
http://nassetwind.com/?page_id=349
1 rue d'Estienne d'Orves, Base de Keroman 56100 LORIENT
Technologies clés : 43

Pôle Mer Bretagne Atlantique

Pôle de compétitivité
02 98 05 63 17
<http://www.pole-mer-bretagne-atlantique.com/fr/contact>
40 Rue Jim Sévellec, 29200 Brest
Technologies clés : 43

Polymar

Entreprise
02 98 88 04 57
Aéropôle Centre 29600 Morlaix
Technologies clés : 8

Ponsel

Entreprise
02 97 89 25 30
ZA de Bellevue - 35 rue Michel Marion 56850 CAUDAN
Technologies clés : 35

Saltel

Entreprise
02 23 41 64 12

contact@saltel-industries.com
Campus de Ker Lann - Rue Siméon Poisson 35170 Bruz
Technologies clés : 15

Silia VL

Entreprise
02 96 05 80 50
contact@silia.com
4 Avenue Pierre Marzin 22300 LANNION
Technologies clés : 42

Siradel

Entreprise
02 23 48 05 00
<http://www.siradel.com/fr/contact/>
2 Parc de Brocéliande 35760 Saint-Grégoire
Technologies clés : 6

TDF

Télédiffusion de France
Entreprise
xavier.colas@tdf.fr
TDF DIRECTION TECHNIQUE - Rennes Atalante Beaulieu, 2 rue du Clos Courtel CS 37716 - 35577 CESSON-SEVIGNE CEDEX
Technologies clés : 6

Vegenov

CRT
02 98 29 06 44
contact@vegenov.com
Penn ar Prat - 29250 Saint Pol de Léon
Technologies clés : 27

Voxygen

Entreprise
02 96 14 12 81
contact@voxygen.fr
Route du Radôme - Pôle Phoenix - Bâtiment B1 - 22560 Pleumeur-Bodou
Technologies clés : 47

BPI Bretagne

BPI
02 99 29 65 70
<http://contact.bpifrance.fr/#>
6, place de Bretagne CS 34406 35044 Rennes Cedex
Technologies clés :

Emergys

Incubateur
02 99 12 73 73
yy.legoffic@rennes-atalante.fr
15 rue du Chêne Germain
35510 Cesson Sévigné
Technologies clés :

Ouest Valorisation

SATT
0299 87 56 01
info@ouest-valorisation.fr
14 C, rue du pâtis Tatelin
Métropolis 2 CS 80 804
35 708 Rennes Cedex
Technologies clés :

Valorial

Pôle de compétitivité
02 23 48 59 64
valorial@pole-valorial.fr
<http://www.pole-valorial.fr/52/divers/contact-et-access/>
Agrocampus Ouest - Bât 16 B - 65 rue de St Briec CS 84215 - 35042 RENNES CEDEX
Technologies clés : 27, 28

Sanden

Entreprise
02 90 02 65 30
<http://www.sanden-es.com/accueil/contact>
4 rue René Dumont
35000 Rennes
Technologies clés : 40

M2S

Mouvement Sport Santé
Académique
02 90 09 15 80
<http://m2slab.com/fr/laboratoire/nous-contacter>
Avenue Robert Schuman
35170 Bruz
Technologies clés :

DIRECCTE Bretagne

DIRECCTE
02 99 12 22 22
bretag-polec@polec.direccte.gouv.fr
http://www.bretagne.direccte.gouv.fr/accueil-26

Pôle C Immeuble "Le Newton"
3 bis avenue de Belle Fontaine TSA
817751

Technologies clés :

CENTRE**BRGM**

Institut Carnot BRGM
Institut Carnot
02 38 64 34 34
3 avenue Claude-Guillemain, BP 36009,
45060 Orléans Cedex 2

Technologies clés : 2, 15, 16, 36, 37

Pôle DREAM

Pôle de compétitivité
02 38 69 80 52
contact@poledream.org
16 rue Léonard de Vinci - CS 30019 -
45074 Orléans Cedex 2

Technologies clés : 35, 36

S2E2

Pôle de compétitivité
02 47 42 41 21
natacha.brebion-s2e2-ext@st.com
http://www.s2e2.fr/fr/contact
10, rue Thalès de Milet - CS 97 155 -
37071 TOURS Cedex 2

Technologies clés : 22, 40

Antéa France

Entreprise
02 38 23 23 00
ZONE D'AMENAGEMENT CONCERTÉ
DU MOULIN 803 BOULEVARD
DUHAMEL DU MONCEAU 45160
OLIVET

Technologies clés : 37

CEA Fontenay-aux-roses

Académie
01 46 54 70 80
http://fontenay-aux-roses.cea.fr/far/
Pages/Formulaire-de-contact.aspx
18 Route du Panorama, 92260
Fontenay-aux-Roses

Technologies clés : 44

CEMHTI (Orléans)

Conditions Extrêmes et Matériaux :
Haute Température et Irradiation
Académie
02 38 25 55 24
dir.cemhti@cncrs-orleans.fr
1D avenue de la Recherche
Scientifique 45071 ORLEANS cedex 2

Technologies clés : 23

CERIB

Centre d'Études et de Recherches de
l'Industrie du Béton
CTI
02 37 18 48 00
1 rue des Longs Réages CS 10010 FR -
28233 ÉPERNON CEDEX

Technologies clés : 38

Elastopole

Pôle de compétitivité
02 38 45 75 87
http://www.elastopole.com/Contact
5 rue du Carbone - 45072 ORLEANS
Cedex 2

Technologies clés : 16

Galys Laboratoire

Entreprise
02 54 55 88 88
http://www.galys-laboratoire.fr/
contact
14, rue André Boule 41 000 BLOIS

Technologies clés : 36

GICC

Génétique Immunothérapie, Chimie
et Cancer
Académie
02 47 36 60 79
gicc-cnrs@univ-tours.fr
GICC - UMR 7292 - UFR de Médecine
- Bâtiment Vialle - 10 boulevard
Tonnelé - BP 3223 - 37032 Tours
Cedex 01

Technologies clés : 15

IDDEA Ingénierie

Entreprise
02 38 25 15 62
contact@iddea-ingenierie.fr
289, boulevard Duhamel du Monceau
- 45160 OLIVET

Technologies clés : 37

Vergnet

Entreprise
02 38 52 35 60
http://www.vergnet.com/contact.php
12 rue des Châtaigniers 45140
ORMES

Technologies clés : 43

Vernon

Entreprise
02 47 37 42 78
contact@vernon.com
180 rue du Général Renault 37038
Tours

Technologies clés : 14

BPI Centre

BPI
02 38 22 84 66
http://contact.bpifrance.fr/#
32, rue Boeuf Saint-Paterne BP 14537
45045 Orléans Cedex 1

Technologies clés :

Cosmetic Valley

Pôle de compétitivité
02 37 211 211
cosmetic-valley@cosmetic-valley.com
1 place de la Cathédrale 28000
Chartres

Technologies clés : 8

Lanceo

Incubateur
02 38 88 88 71
melodie.fourez@arittcentre.fr
6 rue du carbone
45072 Orléans cedex 2

Technologies clés :

DIRECCTE Centre

DIRECCTE
02 38 72 79 10
dr-centre.direction@direccte.gouv.fr
http://www.centre.direccte.gouv.fr/
accueil-24

Pôle C 1 bis, rue Saint Euverte

Technologies clés :

Champagne-Ardenne**ARD**

Agro-Industrie Recherche
et Développement
Association d'industriels
http://www.a-r-d.fr/contact-38.html
Route de Bazancourt
51110 Pomacle

Technologies clés : 24

3A

Applications Additives Avancées
Entreprise
03 52 18 00 50
info@rm4metal.com
Pôle Technologique de Haute-
Champagne - Rue Lavoisier 52800
NOGENT

Technologies clés : 9

Inserm Laboratoire Interface

Biomatériaux - Tissus hôtes
Académie
03 26 91 86 42
dominique.laurent-maquin@univ-
reims.fr
1, rue du Maréchal Juin
51095 REIMS cedex, France

Technologies clés : 1

Les Chanvrières de l'Aube

Entreprise
03 25 92 31 92
Rue du Général de Gaulle, 10200 Bas
sur Aube

Technologies clés : 39

LNIO

Laboratoire de Nanotechnologie et
d'Instrumentation Optique, UTT
Académie
03 25 71 56 65
renaud.bachelot@utt.fr
12 Rue Marie Curie, BP 2060, 10010

Troyes

Technologies clés : 2

BPI Champagne-Ardenne

BPI
03 26 79 82 30
http://contact.bpifrance.fr/#
Bâtiment Le Naos 9, rue Gaston Boyer
51722 Reims Cedex

Technologies clés :

Incubateur CARINNA

Incubateur
03 26 85 85 44
franck.morel@carinna.fr
14 rue Gabriel Voisin
51100 Reims

Technologies clés :

DIRECCTE Champagne-Ardenne

DIRECCTE
03 26 66 29 65
champ-polec@direccte.gouv.fr
http://www.champagne-ardenne.
direccte.gouv.fr/accueil-32

Pôle C 21 Bd Léon Blum BP 26

Technologies clés :

CORSE**Université de Corse**

Académie
04 95 45 06 71
myrte@univ-corse.fr
Centre de Recherches Georges Péri
Vignola, Route des Sanguinaires,
20000 Ajaccio

Technologies clés : 25

BPI Corse

BPI
04 95 10 60 90
http://contact.bpifrance.fr/#
7, rue du Général Campi BP314
20177 Ajaccio Cedex 1

Technologies clés :

INIZIA

Incubateur
04 95 26 69 96
emmanuel.pierre@iei-inizia.fr
Immeuble Castellani
Quartier Saint Joseph
20290 Ajaccio

Technologies clés :

DIRECCTE Corse

DIRECCTE
04 95 23 90 47
corse.polec@direccte.gouv.fr
http://www.corse.direccte.gouv.fr/
Corse

Pôle C 2 chemin de Loretto BP 332

Technologies clés :

Étranger**Escl (Artemis - Programme**

Européen)
Recherche
Réseau international
info@artemis-ia.eu
High Tech Campus 69-3, 5656 AG
Eindhoven, Pays-Bas

Technologies clés : 20

IPA

International Probiotics Association
Association
info @ internationalprobiotics.org
http://www.internationalprobiotics.
org/contact

Technologies clés : 28

Franche-Comté

LERMPS - UTBM
Académie
03 84 58 30 00
laboratoire.lermmps@utbm.fr
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE
BELFORT-MONTBÉLIARD
90010 Belfort cedex

Technologies clés : 9

BCB Tradical

Entreprise
03 81 47 40 10
contact@bcb-tradical.com
Zone d'aménagement concerté
Valentin 25870 CHATILLON LE DUC

Technologies clés : 39

CG-Tec

Entreprise
03 81 89 87 26
26, rue du Lhotaud, F- 25560 FRASNE

Technologies clés : 18

FEMTO ST

Franche-Comté Électronique
Mécanique Thermique et Optique -
Sciences et Technologies
Académie
03 63 08 24 00
contact@femto-st.fr

15b avenue des Montboucons

Besançon, Doubs 25030

Technologies clés : 2

Pôle des Microtechniques

Pôle de compétitivité
03 81 25 53 65
contact@polemicrotechniques.fr
TEMIS INNOVATION 18 rue Alain
Savary 25000 Besançon

Technologies clés : 1

SeT

Systèmes et Transports (Université de
Technologie de Belfort-Montbéliard)
Académie
03 84 58 33 19
set@utbm.fr

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE
BELFORT-MONTBÉLIARD 90010 Belfort
cedex

Technologies clés : 14

BPI Franche-Comté

BPI
03 81 47 08 30
http://contact.bpifrance.fr/#
Parc Artemis 17D, rue Alain Savary
25000 Besançon

Technologies clés :

IEI-FC

Incubateur
03 81 66 67 29
blandine.tatin@univ-fcomte.fr
18 rue Alain Savary
25000 Besançon

Technologies clés :

Percipio Robotics

Entreprise
03 81 25 03 80
contact@percipio-robotics.com
18 Rue Alain Savary, 25000 Besançon

Technologies clés : 12

DIRECCTE Franche-Comté

DIRECCTE
03 81 65 89 13
franch-polec@direccte.gouv.fr
http://www.franche-comte.direccte.
gouv.fr/accueil-22

Pôle C 5 place Jean Cornet

Technologies clés :

Guadeloupe**BPI Guadeloupe**

BPI
05 90 89 65 58
http://contact.bpifrance.fr/#
Parc d'activités de la Jaille - Bât. 7 BP
110 97122 Baie-Mahaut

Technologies clés :

DIECCTE Guadeloupe

DIRECCTE
05 90 99 35 99
971-polec@dieccte.gouv.fr
http://www.guadeloupe.dieccte.gouv.
fr/Guadeloupe

Chemin des bougainvilliers-Guillard

Technologies clés :

GUYANE**Cofely Endel - Kourou**

Entreprise
R&D
05 94 32 72 00
service.communication@cofelyendel-
gdfsuez.com
av Préfontaine, 97310 KOUROU

Technologies clés : 15

Amazinc

Incubateur
franck.roubaud@ardi-gdi.fr
Guyane Développement Innovation
CS 90235

97325 CAYENNE CEDEX

Technologies clés :

BPI Guyane

BPI
05 94 29 90 90
<http://contact.bpifrance.fr/#>
c/o AFD - Lotissement Les Héliconias
Route de Baduel - BP 1122 97345
Cayenne Cedex

Technologies clés :

DIECCTE Guyane

DIECCTE
05 94 25 61 00
973-polec@dieccte.gouv.fr
<http://www.guyane.dieccte.gouv.fr/>
Guyane
Angle rues Rouget de l'Isle et Mme
Payé BP 6009

Technologies clés :

Haute-Normandie

Mov'eo

Pôle de compétitivité
02 32 91 54 50
contact@pole-moveo.org
Technopôle du Madrillet, Avenue
Galilée BP 20060, 76801 St Etienne
du Rouvray

Technologies clés : 10, 12, 23, 45

Total - Raffinerie de Normandie

Entreprise
02 35 11 50 00
<http://www.total.com/fr/formulaire-de-contact>
Total - Raffinerie de Normandie
BP98 - 76700 Harfleur

Technologies clés : 15, 22, 41

ESP

Énergie et Systèmes de Propulsion
Institut Carnot
02 32 95 36 14
contact@carnot-esp.fr
Technopôle du Madrillet - Avenue
de l'Université - BP 12 - 76801 Saint
Etienne du Rouvray

Technologies clés : 7, 43, 45

INSA

Académie
02 32 95 97 00
insa@insa-rouen.fr
Avenue de l'Université, 76800 Saint-
Étienne-du-Rouvray

Technologies clés : 7, 45

Novalog

Pôle de compétitivité
02 78 63 00 05
info@novalog.eu
Docks Dombasle - 2, rue Dombasle -
76600 Le Havre

Technologies clés : 10, 12

Affinisep

Entreprise
02 32 59 61 01
contact@affinisep.com
Pharma Parc II - Voie de l'Innovation
- Chaussée du Vexin 27100 VAL-DE-
REUIL

Technologies clés : 1

Biocéane

Entreprise
02 35 42 52 75
<https://www.bioceane.fr/nous-contacter/>
132 Boulevard François 1^{er} 76600
Le Havre

Technologies clés : 28

Cuiller Frères

Entreprise
02 35 68 15 64
contact@cuiller.fr
551 RUE PIERRE ET MARIE CURIE -
76650 PETIT COURONNE

Technologies clés : 39

Fouré Lagadec

Entreprise
02 35 25 59 99
http://www.fourelagadec.com/dm_contact.html
164 boulevard de Gravelle 76600 Le
Havre

Technologies clés : 43

FranceWatts

Entreprise
02 35 91 02 02
<http://www.francewatts.fr/contact/>
436, boulevard de Normandie - BP 7 -
76360 Barentin

Technologies clés : 42

IRSEEM

Institut de Recherche en Systèmes
Électronique Embarquée
Académie
02 32 91 58 58
irseem@esigelec.fr
Technopôle du Madrillet - Avenue
Galilée - BP 10024 - 76801 Saint-
Étienne-du-Rouvray

Technologies clés : 20

Lineo

Entreprise
03 21 66 24 77
16 RUE GEORGES CHARPAK 76130
MONT-SAINT-AIGNAN

Technologies clés : 1

LITIS - INSA ROUEN

Laboratoire d'Informatique,
de Traitement de l'Information
et des Systèmes.
Académie
02 32 95 50 11
secretariat@litislab.fr
Laboratoire LITIS - EA 4108 -
Université de ROUEN - UFR Sciences
et Techniques - Avenue de l'université
76800 SAINT ETIENNE DU ROUVRAY
FRANCE

Technologies clés : 11

Saftair - Ventilation

Entreprise
02 35 04 69 15
saftair@saftair.com
Rue du Levant 76590 TORCY-LE-PETIT

Technologies clés : 40

Sysnav

Entreprise
02 78 77 03 46
57, rue de Montigny 27200 Vernon

Technologies clés : 2

Terre de Lin

BPI
02 35 97 41 33
http://www.terredelin.com/hp/page-contact.aspx?theme=tdl_fr&
605, route de la vallée 76740 Saint-
Pierre-le-viger

Technologies clés : 39

BPI Haute-Normandie

BPI
02 35 59 26 36
<http://contact.bpifrance.fr/#>
20, place Saint-Marc 76000 Rouen

Technologies clés :

SEINARI Incubation

Incubateur
02 32 10 23 03
fabien.lieval@seinari.fr
73 rue Martainville
76000 Rouen

Technologies clés :

DIRECCTE Haute Normandie

DIRECCTE
02 32 81 88 88
hnorm-polec@direccte.gouv.fr
<http://www.haute-normandie.direccte.gouv.fr/accueil-30>
pôle C 30 rue H.Gadeau de Kerville -
Immeuble les Galées du Roi

Technologies clés :

ILE-DE-FRANCE

INRIA

Institut national de recherche en
informatique et en automatique
Institut Carnot
01 39 63 55 11
Domaine de Voluceau, 78150
Roquencourt

Technologies clés : 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 33, 35, 45, 46, 47

Systematic

Pôle de compétitivité
01 69 08 06 85
contact@systematic-paris-region.org
Site Nano Innov, 8, avenue de la
Vauve, bâtiment 863 - CS 70005,
91127 PALAISEAU Cedex

Technologies clés : 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 20, 21, 22, 33, 34, 45, 47

CEA LIST

Institut Carnot
info-list@cea.fr
Nano-INNOV, Avenue de la Vauve
91120 Palaiseau

Technologies clés : 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 14, 20, 44, 45, 47

CapDigital

Pôle de compétitivité
01 40 41 11 60
14 rue Alexandre Parodi 75010 Paris

Technologies clés : 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 22, 33, 47

SystemX

IRT
01 69 08 05 68
contact@irt-systemx.fr
Centre d'intégration Nano-INNOV -
Bât N3, 8, Avenue de la Vauve 91120
PALAISEAU

Technologies clés : 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 34, 47

M.I.N.E.S.

Méthodes Innovantes pour l'Entreprise
et la Société
Institut Carnot
01 40 51 90 50
60, Boulevard Saint Michel 75272
PARIS Cedex 06

Technologies clés : 2, 7, 9, 12, 13, 24, 25, 41, 44, 45

Thales Research and Technology

Entreprise
01 69 41 55 00
<https://www.thalesgroup.com/fr/content/contactez-nous>
Campus Polytechnique 1 av Augustin
Fresnel 91767 PALAISEAU Cedex

Technologies clés : 3, 5, 6, 7, 9, 14, 20, 46

IFPEN

IFP Energies nouvelles
Académie
01 47 52 60 00
1-4, avenue de Bois Préau, 92852
Rueil Malmaison

Technologies clés : 7, 8, 15, 18, 24, 25, 26, 43, 45

IRSTEA

Irstea Institut national de recherche
en sciences et technologies pour
l'environnement et l'agriculture
Institut Carnot
01 40 96 61 21
1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS
10030 92761 Antony cedex

Technologies clés : 2, 7, 10, 12, 24, 35, 36, 41, 45

EDF

Entreprise
R&D
01 47 65 43 21
1, avenue du général de Gaulle
92141 Clamart Cedex

Technologies clés : 2, 21, 22, 42, 43, 44, 46

Alcatel-Lucent

Entreprise
01 30 77 30 77
7 Route de Villejust, 91620 Nozay

Technologies clés : 4, 6, 11, 13, 20, 22, 46

Arkema

Entreprise
01 49 00 80 80
420 rue d'Estienne d'Orves 92705
Colombes Cedex

Technologies clés : 1, 8, 9, 23, 24, 41, 42

TSN

Télécom et Société numérique
Institut Carnot
01 45 81 80 80
Institut Mines-Télécom, 46 rue
Barrault 75634 Paris Cedex 13

Technologies clés : 7, 10, 11, 12, 13, 34, 45

Orange

Entreprise
R&D
01 45 29 44 44
infos.groupe@orange.com
<http://laborange.fr/contact>
38-40 Rue du Général Leclerc, 92130
Issy-les-Moulineaux

Technologies clés : 3, 5, 6, 7, 13, 14

Atos

Entreprise
01 73 26 00 00
<http://fr.atos.net/fr-fr/accueil/nous-contacter/contact-form>
HTML?xud=SHD-UVukh8PLGc7Qs_
Oza
80 quai Voltaire 95877 Bezons cedex

Technologies clés : 3, 4, 5, 6, 14, 34

Dassault Systemes

Entreprise
R&D
01 70 73 43 63
rbr@3ds.com
10 rue Marcel Dassault - CS 40501 -
78946 Vélizy-Villacoublay Cedex

Technologies clés : 4, 5, 11, 14, 20, 47

Medicen

Pôle de compétitivité
01 79 68 10 86
jdecanton@medicen.org
3-5 impasse Reille, 75014 Paris

Technologies clés : 2, 15, 18, 26, 29, 33

Véolia

Entreprise
01 34 93 31 31
Chemin de la Digue, 78600 Maisons-
Laffitte

Technologies clés : 2, 4, 5, 35, 37

AirLiquide

Entreprise
01 49 83 55 55
57 Avenue Carnot 94500
CHAMPIGNY SUR MARNE

Technologies clés : 9, 24, 25, 41, 42

CSTB

Centre scientifique et technique du
bâtiment
CTI
Institut Carnot
01 64 68 82 82
84, avenue Jean Jaurès Champs sur
Marne 77447 Marne la Vallée cedex 2

Technologies clés : 26, 38, 39, 40, 41

Sanofi

Entreprise
01 53 77 40 00
<http://www.sanofi.com/contact/contact.aspx>
54, rue La Boétie 75008 Paris

Technologies clés : 8, 15, 18, 18, 26

Valéo

Entreprise
01 48 98 86 00
2, rue André Boulle, Créteil Cedex
94046, Créteil

Technologies clés : 2, 5, 7, 20, 45

Safran

Entreprise
01 40 60 80 28
catherine.malek@safran.fr
2, bd du Général Martial Valin 75015
Paris

Technologies clés : 1, 2, 20, 45

EDF

Entreprise
R&D
01 60 73 60 73
Avenue des Renardières, 77250
Écuelles

Technologies clés : 2, 23, 40, 44

Saint Gobain

Entreprise
R&D
01 48 39 58 00
39 Quai Lucien Lefranc, 93300
Aubervilliers
Technologies clés : 1, 2, 38, 39

Bouygues Construction

Entreprise
01 30 60 33 00
<https://www.bouygues-construction.com/contact>
1, avenue Eugène Freyssinet
Guyancourt 78061 Saint-Quentin-en-Yvelines
Technologies clés : 2, 37, 39, 46

CentraleSupélec

Académie
01 69 85 12 12
communication@centralesupelec.fr
Plateau de Moulon 3 rue Joliot-Curie
F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex
Technologies clés : 3, 6, 20, 22

CRIGEN

Académie
01 49 22 59 85
361 Avenue du Président Wilson,
93210 Saint-Denis
Technologies clés : 22, 24, 25, 41

Dassault Aviation

Entreprise
R&D
01 47 11 40 00
<http://www.dassault-aviation.com/fr/services/contacts/>
78, quai Marcel Dassault, Cedex 300,
92552 SAINT CLOUD
Technologies clés : 7, 9, 21, 45

Global Bioenergies

Start-up
01 64 98 20 50
<http://www.global-bioenergies.com/contact/>
5, rue Henri Desbrières 91000 Evry
Technologies clés : 8, 15, 24, 26

Institut Pasteur

Académie
01 45 68 80 00
25-28 rue du Dr Roux 75015 Paris
Technologies clés : 15, 18, 26, 29

ISIR

Institut des systèmes intelligents
et de robotique
Académie
01 44 27 51 41
contact@isir.upmc.fr
Université Pierre et Marie CURIE,
Pyramide - T55/65 CC 173 - 4 Place
Jussieu 75005 Paris
Technologies clés : 7, 10, 11, 12

STMICROELECTRONICS

Entreprise
01 58 07 75 75
29 boulevard Romain Rolland, 75669
PARIS CEDEX 14
Technologies clés : 2, 5, 7, 46

Renault Technocentre

Entreprise
01 76 84 04 04
andras.kemeny@renault.com
1 Avenue du Golf, 78280 Guyancourt
Technologies clés : 7, 20, 45

EDF

Entreprise
R&D
01 30 87 72 44
6 Quai Watier, 78400 Chatou
Technologies clés : 2, 21, 44

Advancity

Pôle de compétitivité
01 45 92 65 96
florence.castel@advancity.eu
c/o Esiee, 2 Boulevard Blaise Pascal
93162 NOISY-le-GRAND cedex
Technologies clés : 22, 35, 40

Aldebaran Robotics

Entreprise
01 77 37 17 59
contact@aldebaran-robotics.com
43 Rue Du Colonel Pierre Avia 75015
PARIS 15
Technologies clés : 5, 10, 12

Alten

Entreprise
01 46 08 72 00
<http://www.alten.fr/contact>
40 Avenue André Morizet 92100
Boulogne Billancourt
Technologies clés : 6, 7, 20

Areva

Entreprise
01 34 96 00 00
Tour AREVA, 1, place Jean Millier,
92400 Courbevoie
Technologies clés : 2, 43, 44

CapGemini

Entreprise
01 49 67 30 00
<https://www.fr.capgemini.com/contact>
Tour Europlaza - 20, avenue André
Prothin - 92927 Paris - La Défense
Cedex
Technologies clés : 4, 7, 34

Cirad

Académie
01 53 70 20 00
42, rue Scheffer, 75116 Paris
Technologies clés : 18, 24, 27

FPDC

Fédération Professionnelle du Drone
Civil
Association
09 72 45 72 79
contact@federation-drone.org
16 rue de la Comète, 75007 Paris
Technologies clés : 10, 12, 21

IFREMER

Institut français de recherche pour
l'exploitation de la mer
Académie
01 46 48 21 00
155, rue Jean-Jacques Rousseau, 92
138 Issy-les-Moulineaux Cedex
Technologies clés : 2, 28, 43

IHU Imagine

Institut des maladies Génétiques -
Hopital Necker
IHU
01 42 75 42 00
contact@institutimagine.org
24, Boulevard de Montparnasse
75015 PARIS
Technologies clés : 15, 26, 29

Parrot

Entreprise
01 48 03 60 60
174, quai de Jemmapes, 75010 Paris
Technologies clés : 2, 5, 12

PSA Peugeot Citroën

Entreprise
01 57 59 30 00
Route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay
Technologies clés : 11, 20, 45

RTE

Réseau de transport d'électricité
Entreprise
01 79 24 85 27
rte-projet-fab@rte-france.com
100 esplanade du Général de Gaulle
92932 La défense
Technologies clés : 4, 22, 40

SYMOP

Association
01 47 17 67 17
Maison de la Mécanique, 45 rue
Louis-Blanc 92400 Courbevoie
Technologies clés : 10, 12, 21

Technicolor

Entreprise
01 41 86 50 00
1-5 rue Jeanne d'Arc 92130 Issy les
Moulineaux
Technologies clés : 3, 11, 47

DCNS

Entreprise
01 40 59 50 00
<http://fr.dcnsgroup.com/nous-contacter/>
40 rue du Docteur Finlay - 75015 Paris
Technologies clés : 14, 43

Hôpital Saint Louis - Thérapie cellulaire

Académie
01 42 49 47 50
1 Avenue Claude-Vellefaux
75010 Paris
Technologies clés : 29, 31

Bouygues Telecom

Entreprise
contact@btinitiatives.fr
<https://www.btinitiatives.fr/contacts/>
13/15 Avenue du Maréchal Juin,
92300 Meudon-La-Forêt
Technologies clés : 5, 6

Saint Gobain Glass - Crdc

Entreprise
R&D
01 48 39 58 00
<http://www.saint-gobain-recherche.fr/fr/contact#>
39, quai Lucien Lefranc, B. P. 135
93303 Aubervilliers Cedex FRANCE
Technologies clés : 23, 42

Medissimo

Entreprise
01 30 06 30 06
<https://www.medissimo.fr/fr/contact/>
Technoparc - 8, rue Charles-Edouard
Jeanneret 78300 Poissy
Technologies clés : 5, 33

3DEXPERIENCE Platform - Dassault système

Entreprise
R&D
<http://www.3ds.com/how-to-buy/contact-sales/>
78946 Vélizy-Villacoublay Cedex
Technologies clés : 11, 47

Abolis

Start-up
06 81 90 31 64
contact@abolis.fr
Géopole Campus, Bât 6, 5 Rue Henri
Desbrières 91030 Evry Cedex
Technologies clés : 8, 24

Actia

Réseau français des instituts
techniques de l'agro-alimentaire
Association
Réseau
01 44 08 86 20
actia@actia-asso.eu
16 rue Claude-Bernard, 75231 Paris
Cedex 5
Technologies clés : 2, 7

Actility

Entreprise
01 83 64 65 41
contact@actility.com
65-67, rue de la Victoire 75009, Paris
Technologies clés : 5, 22

Ademe

Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie
Agence publique
01 47 65 20 00
<http://www.ademe.fr/content/contacter>
27 rue Louis Vicat 75737 PARIS
Cedex 15
Technologies clés : 37, 39

Adisseo

Entreprise
01 46 74 70 00
Immeuble Antony Parc 2 - 10, Place
du Général de Gaulle 92160 Antony
Technologies clés : 8, 28

AKKA

Entreprise
R&D
01 56 69 26 59
akka.research@akka.eu
9-11 rue Montalivet, 75 008 PARIS
Technologies clés : 7, 20

Akuo Energy

Entreprise
01 47 66 09 90
contact@akuoenergy.com
140, avenue des Champs Elysées
75008 Paris
Technologies clés : 42, 43

Altran

Entreprise
R&D
01 30 67 48 00
<http://www.altran.fr/contact.html#>
Va-QMPnAay0
2, rue Paul Dautier 78457 Vélizy-
Villacoublay
Technologies clés : 7, 20

ARTS

Actions de Recherche pour la
Technologie et la Société
Institut Carnot
06 63 82 66 49
bertrand.coulon@ensam.eu
<http://www.ic-arts.eu/contacts/>
151, Bd de l'Hôpital 75 013 Paris
Technologies clés : 9, 11

Assystem

Entreprise
01 55 65 03 00
70, boulevard de Courcelles - 75017
Paris
Technologies clés : 7, 44

Astech

Pôle de compétitivité
01 55 64 04 60
sebastien.courrech@pole-astech.org
<http://www.pole-astech.org/site/pages/index.php?lang=fr§ion=contacts>
ASTech Paris Region - 8 Rue des
Vertugadins 92190 Meudon
Technologies clés : 20, 45

AVIESAN

Alliance nationale pour les sciences
de la vie et de la santé
CVT
<http://www.aviesan.fr/fr/aviesan/accueil/contact>
Bâtiment A - 1^{er} étage - 8 rue
de la Croix Jarry 75013 Paris
Technologies clés : 15, 29

Avril

ex - Sofiproteol
Entreprise
01 40 69 48 00
11 rue Monceau, CS60003, 75378
PARIS CEDEX 08
Technologies clés : 8, 24

CAOR/Mines ParisTech

Centre de Robotique ParisTech
Académie
caor@mines-paristech.fr
60 Boulevard Saint-Michel, 75005
Paris
Technologies clés : 10, 12

Carmat

Entreprise
01 39 45 64 50
contact@carmatsas.com
36, avenue de l'Europe, CS 40533
- Immeuble l'Etendard 78941 Vélizy
Villacoublay CEDEX
Technologies clés : 1, 31

Cegedim

Entreprise
01 49 09 22 00
127 rue d'Aguesseau 92100
Boulogne-Billancourt
Technologies clés : 4, 33

Collectis

Entreprise
01 81 69 16 00
<http://www.collectis.com/fr/content/contact>
8 rue de la Croix Jarry 75013 Paris
Technologies clés : 26, 29

CIMV

Compagnie Industrielle de la Matière
Végétale
Start-up
01 46 24 30 29
contact@cimv.fr
11, rue Louis Philippe 92200 Neuilly
sur Seine
Technologies clés : 15, 24

CNIL

Commission nationale de
l'informatique et des libertés
Agence Publique
01 53 73 22 22

8, rue Vivienne - CS 30223 - 75083 Paris cedex 02
Technologies clés : 33, 34

Confluents
(Issu de l'association de 6 groupes majeurs - groupement IGNES)
Start-up
<http://www.sasconfluents.com/>
17 RUE DE L AMIRAL HAMELIN 75116 PARIS
Technologies clés : 2, 40

Eiffage
Entreprise
01 34 65 89 89
163 quai du Docteur-Dervaux 92601 Asnières-sur-Seine cedex
Technologies clés : 5, 39

Engie - CRIGEN
Entreprise
R&D
01 49 22 59 85
<http://www.engie.com/contact/>
361 Avenue du Président Wilson, 93210 Saint-Denis
Technologies clés : 24, 40

ENSTA
École nationale supérieure de techniques avancées
Académique
01 81 87 17 40
nathalie.branger@ensta-paristech.fr
828, Boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex
Technologies clés : 7, 45

Environnement SA
Entreprise
01 39 22 38 00
s.aflalo@environnement-sa.com
<http://www.environnement-sa.fr/>
contactez-nous/
111 boulevard Robespierre – 78300 Poissy
Technologies clés : 2, 36

Eramet
Entreprise
01 30 66 27 27
eramet-research@erametgroup.com
1 Rue Albert Einstein, 78190 Trappes
Technologies clés : 1, 16

ESIEE
Académique
01 45 92 65 00
<http://www.esiee.fr/fr/contact>
2 boulevard Blaise Pascal - Cité Descartes - BP 99 - 93162 Noisy-le-Grand Cedex
Technologies clés : 13, 20

Faurecia
Entreprise
01 72 36 70 00
<http://www.faurecia.com/fr/formulaire-de-contact>
2, rue Hennape – 92000 NANTERRE
Technologies clés : 1, 45

FCBA
Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement
CTI
01 72 84 97 84
<http://www.fcba.fr/content/contacts?ref=main>
10 rue Galilée 77420 Champs-sur-Marne
Technologies clés : 24, 38

FeetMe
Start-Up
contact@feetme.fr
96 bis bd Raspail 75006 Paris
Technologies clés : 2, 5

Gemalto
Entreprise
01 55 01 50 00
6, rue de la Verrerie - CS20001 - 92197 Meudon Cedex
Technologies clés : 34, 46

Genci
Grand Equipment National de Calcul Industriel
Association
01 42 50 04 15

<http://www.genci.fr/fr/contact>
12 rue de l'Eglise 75015 PARIS
Technologies clés : 4, 21

Génopole d'Evry
Académique
01 60 87 83 00
presse@genopole.fr
<http://www.genopole.fr/>-Contactez-nous-.html#chercheur
5, Rue Henri Desbrières 91 030 Evry Cedex
Technologies clés : 18, 29

Hub One
Entreprise
01 74 37 24 24
<http://www.hubone.fr/a-propos/contact>
4 rue de La Haye, BP11937 - Roissy-CDG Le Dome - Tremblay-en-France, 95732 Roissy CDG
Technologies clés : 6, 13

Hybrigenics
Entreprise
01 58 10 38 00
<http://www.hybrigenics.com/contact>
3-5 impasse Reille 75014 Paris
Technologies clés : 18, 26

IFPEN TE
IFPEN Transports Energie
Académique
Institut Carnot
gaetan.monnier@ifpen.fr
1-4, avenue de Bois Préau 92852 Rueil Malmaison
Technologies clés : 2, 24

Institut Curie
Académique
01 56 24 55 00
26 rue d'Ulm 75248 Paris cedex 05
Technologies clés : 15, 29

Institut des biothérapies - AFM
Académique
<http://www.institut-biotherapies.fr/contacts/>
Département Ressources Humaines, 1 bis rue de l'Internationale, BP 60, 91002 EVRY Cedex
Technologies clés : 26, 29

Institut Mines Telecom
Académique
01 45 81 80 80
<http://www.mines-telecom.fr/contacts-acces/>
46 rue Barrault 75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 3, 6

IVEA - Solution
Start-up
01 69 35 88 20
info@ivea-solution.com
Centre Scientifique d'Orsay - Batiment 503 - 91400 Orsay
Technologies clés : 37, 44

Klearia
Start-up
01 69 63 61 29
info@klearia.com
Site Data IV - Route de Nozay 91460 Marcoussis
Technologies clés : 18, 36

Kronosafe
Entreprise
01 77 93 21 59
<http://www.krono-safe.com/request-form/>
Bât Erable - 86 rue de Paris, 91400 Orsay
Technologies clés : 19, 20

Lafarge
Entreprise
01 44 34 11 11
61 rue des Belles Feuilles 75116 Paris
Technologies clés : 38, 39

LIP6 (UPMC)
Laboratoire d'Informatique de Paris 6
Académique
01 44 27 87 69
Paule.Mayenga@nullip6.fr
Boîte courrier 169 Tour 26, Couloir 26-00, 2è étage 4 place Jussieu 75252 Paris Cedex 05
Technologies clés : 6, 11, 19, 20

Neonen
Entreprise
01 70 91 62 62
<http://www.neonen.fr/page/contact/>
4 rue Euler, 75008 PARIS
Technologies clés : 42, 43

Netatmo
Start-up
<https://www.netatmo.com/support>
892 rue Yves Kermen, 92100 Boulogne Billancourt
Technologies clés : 5, 36

PARIS ACM SIGGRAPH
Association
<http://paris.siggraph.org/contact-info>
Maison des associations, 4 rue des Arènes 75005 Paris
Technologies clés : 11, 47

Sagem
Entreprise
01 55 60 38 00
Arcs de Seine 18/20 quai du Point du Jour 92659 Boulogne-Billancourt CEDEX
Technologies clés : 6, 11

Sequans Communication
Entreprise
<http://www.sequans.com/contact/sites@sites.fr>
Portes de la Défense
15-55, Boulevard Charles de Gaulle 92700 Colombes
Technologies clés : 6, 13

Sites
Entreprise
01 41 39 02 00
sites@sites.fr
<http://www.sites.fr/index.php/fr/contactez-nous>
SITES, 2bis avenue du centre 92500 RUEIL malmaison
Technologies clés : 2, 40

SPIE
Entreprise
01 34 24 30 00
10 avenue de l'Entreprise, 95863 Cergy-Pontoise cedex
Technologies clés : 39, 44

Suez Environnement
Entreprise
01 58 81 20 00
Tour CB21 - 16, place de l'Iris 92040 Paris La Défense Cedex
Technologies clés : 35, 37

Theravectys
Entreprise
01 43 90 19 20
1, mail du Professeur Georges Mathé 94800 Villejuif
Technologies clés : 15, 26

Vicat
Entreprise
01 58 86 86 86
<http://www.vicat.fr/fr/Pied-de-page/Contact>
Tour Manhattan, 6 place de l'Iris F-92095 PARIS LA DEFENSE CEDEX
Technologies clés : 38, 39

Vinci Energies
Entreprise
01 30 86 70 00
<http://www.vinci-energies.com/contact/>
280 rue du 8 mai 1945 - BP 72 - 78368 Montesson Cedex
Technologies clés : 22, 43

Withings
Start-up
01 41 46 04 60
2 rue Maurice Hartmann, 92130 Issy-les-Moulineaux
Technologies clés : 2, 5

Clinique Jouvenet
Académique
01 42 15 41 24
d.limeri@gsante.fr
6 Square Jouvenet 75016 Paris
Technologies clés : 31

Direct Energie
Entreprise
01 73 03 77 01
modelecc@direct-energie.com
<http://groupe.direct-energie.com/nous-contacter/>
2 bis, rue Louis Armand - 75015 PARIS
Technologies clés : 22

INRA Jouy en Josas
Académique
01 34 65 21 21
<http://www.jouy.inra.fr/infos/contact/2474>
Allée de Vilvert, 78352 Jouy-en-Josas
Technologies clés : 26, 28

Data Sciences Starter Program - Ecole polytechnique
Académique
01 69 33 33 33
<https://www.polytechnique.edu/fr/contact-webform?contact=c2VjcmV0YXlpYXQtZGdhckBwb2x5dGJvGvA5pcXVLMzY>
Route de Saclay, 91128 Palaiseau
Technologies clés : 3

TélécomParisTech - Centre de recherche du numérique: AxSEs Très Grans Réseaux et Systèmes
Académique
01 45 81 77 77
Patrick.Duvaut@telecom-paristech.fr
46 rue Barrault F-75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 6

TélécomParisTech - Filière Image (IMA)
Académique
01 45 81 77 77
patricia.friedrich@telecom-paristech.fr
46 rue Barrault F-75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 14

Airbus
Entreprise
01 46 97 30 00
<http://www.airbusgroup.com/int/en/investors-shareholders/Contact/Contact-Form.html>
12 Rue Pasteur, 92150 Suresnes
Technologies clés : 1

ARD
Association pour la Recherche sur le Diabète
Académique
01 47 23 90 14
ardinfo@a-rd.fr
<http://www.a-rd.fr/node/397>
Bureau 601
19, Boulevard Malesherbes 75008 Paris
Technologies clés : 26

M2O - Orange
Entreprise
01 53 04 40 73
<http://www.m2ocity.com/contact.html>
6 rue de Saint Petersbourg, PARIS 75008
Technologies clés : 35

3BCAR
Institut Carnot
01 42 75 93 64
3bcar@instituts-carnot.eu
Institut Carnot 3BCAR - INRA Transfert - 28, rue du docteur Finlay - 75015 Paris
Technologies clés : 24

ABCell-Bio
Entreprise
01 42 80 19 08
http://www.abcell-bio.com/?tg=addon/forms/form&idx=application&id_app=1
6 rue Pierre Haret 75009 PARIS
Technologies clés : 29

Acta
Association
Réseau des instituts des filières animales et végétales
01 40 04 50 00
<http://www.acta.asso.fr/menu/contacts.html>

149, rue de Bercy
75595 Paris Cedex 12
Technologies clés : 27

AFM

Association française contre les myopathies
Association
afm@afm.genethon.fr
1, rue de l'Internationale
BP 59
91002 EVRY Cedex
Technologies clés : 26

AFPR

Association Française du Prototypage Rapide
Association
http://www.afpr.asso.fr/contact/
5 av. du Maréchal Leclerc 92360
Meudon La Forêt.
Technologies clés : 9

AIMCC

Association des Industriels des Produits de Construction
Association
01 44 01 47 80
contact@aimcc.org
3, rue Alfred Roll -
75849 Paris Cedex 17
Technologies clés : 39

Airbus Defence and space - Centre d'Excellence Electronique

Entreprise
R&D
0 1 82 61 25 00
http://www.space-airbusds.com/fr/contacts/
1, Boulevard Jean Moulin - CS 30503
78997 Elancourt Cedex
Technologies clés : 13

Air-ESIEA

Académie
air-esiea@et.esiea.fr
http://air.esiea.fr/?page_id=41
74bis avenue Maurice Thorez
94200 Ivry-sur-Seine
Technologies clés : 45

Airlinx

Entreprise
09 81 43 46 46
http://air-linx.com/en/contact/
1 avenue de l'Atlantique 91940
Les Ulis
Technologies clés : 13

Ajelis

Start-up
contact@ajelis.com
86 rue de PARIS Orsay, 91400
Technologies clés : 16

Alcatel Thalès III-V Lab

Entreprise
R&D
01 60 40 60 40
Route de Nozay,
F-91461 Marcoussis Cedex
Technologies clés : 46

Alstom Grid

Entreprise
01 49 01 61 00
http://www.alstom.com/fr/general-contact-us/
Immeuble Galilée, 51 Esplanade du Général de Gaulle, Quartier Michelet - La Défense 10 92907
La Défense Cedex
Technologies clés : 22

Alvéole

Start-up
luc.talini@alveolelab.com
Alvéole - 68 bd de Port-Royal
75005 PARIS
Technologies clés : 18

Amarisoft

Entreprise
01 77 62 44 77
http://amarisoft.com/?p=contact
8 AVENUE DU VIEUX CEDRE 91130
RIS ORANGIS
Technologies clés : 6

ANAH

Agence nationale de l'habitat
Agence publique

01 44 77 39 39
8 avenue de l'Opéra 75001 Paris
Technologies clés : 38

Angus.Ai

Entreprise
contact@angus.ai
6 square Desaix 75015 Paris
Technologies clés : 19

ANSES

Entreprise
01 49 77 13 50
14 rue Pierre et Marie Curie 94701
Maisons-Alfort Cedex
Technologies clés : 36

Aqylon

Entreprise
01 42 57 41 53
contact@aqylon.com
46/48, rue René Clair 75592 PARIS
CEDEX
Technologies clés : 41

Aragan

Entreprise
01 44 69 52 02
info@aragan.fr
4 avenue Bertie Albrecht - 75008 Paris
Technologies clés : 28

ARISEM (Thalès)

Entreprise
01 44 88 99 66
emmanuelle.chateau@arise.com
74 RUE D ARCUÉIL
BP 30183
94150 RUNGIS
Technologies clés : 19

Arvalis

Académie
01 44 31 10 00
contact@arvalis-infos.fr
ARVALIS - Institut du végétal - 3 rue
Joseph et Marie Hackin 75016 PARIS
Technologies clés : 27

ASIP Santé

Agence des Systèmes d'Information Partagés de Santé
Agence publique
01 58 45 32 50
9, rue Georges Pitard 75015 PARIS
Technologies clés : 33

Association HQE

Association
01 40 47 02 82
s.benamor@assoHQE.org
4 Avenue du Recteur Poincaré
75016 PARIS
Technologies clés : 39

Ataway

Entreprise
09 54 79 86 30
info-fra@ataway.com
10 rue de la Chaussée d'Antin
75009 PARIS
Technologies clés : 25

Augmentedev

Start-up
01 76 36 09 64
https://manager.augmentedev.com/contact_requests/new?origin=website_footer
107 Avenue Parmentier
75011 Paris
Technologies clés : 14

AutoDesk

Entreprise
01 46 46 38 00
89 Quai Panhard et Levasor,
75013 Paris
Technologies clés : 9

Axens

Entreprise
01 47 14 21 00
http://www.axens.net/contact.html
89, boulevard Franklin Roosevelt -
BP 50802 - 92508 Rueil-Malmaison
Technologies clés : 24

Axway

Entreprise
01 47 17 24 24
https://www.axway.com/en/contact-

us#tablist1-tab1
26, rue des Pavillons, CS 90001 -
92807 Puteaux Cedex
Technologies clés : 4

Bamo-Mesure

Entreprise
01 30 25 83 20
info@bamo.fr
22, Rue de la Voie des Bans -
Parc d'activités de la Gare 95100
ARGENTEUIL
Technologies clés : 36

Bâtir Eco

Cluster
01 81 58 01 31
info@batireco.fr
http://www.batireco.fr/index.php/20
18 Bis rue de l'Industrie 77170
Brie-Comte-Robert
Technologies clés : 38

Bertin Technologies

Entreprise
01 39 30 60 00
http://www.bertin.fr/contact.aspx
Parc d'activités du Pas du Lac - 10 bis,
avenue Ampère 78 180 Montigny-le-
Bretonneux
Technologies clés : 41

Biogénie Europe

Entreprise
01 64 56 78 00
france@biogenie-env.com
Ecosite de Vert-le-Grand, Chemin
de Brasseur, BP 69, 91540 Echarcon
Technologies clés : 37

Bioprox (Proxis Développement)

Entreprise
01 81 93 00 70
rue Barbès - BP 177
- 92305 Levallois-Perret
Technologies clés : 28

Biosystèmes France

Entreprise
01 34 48 99 26
info@biosystemesfrance.com
P.A. des Béthunes - BP. 90458 -
St-Ouen l'Aumône 95005 CERGY
PONTOISE CEDEX
Technologies clés : 27

Bluefrog Robotics

Start-up
01 81 70 99 40
contact@bluefrogrobotics.com
10 rue Coquillière 75001 PARIS
Technologies clés : 12

Brainwave

Entreprise
01 84 19 04 10
contact@brainwave.fr
38-42 rue Gallieni 92600 ASNIERES-
SUR-SEINE
Technologies clés : 19

Burgeap

Entreprise
01 46 10 25 70
27, rue de Vanves
92772 Boulogne Billancourt
Technologies clés : 37

Cadlink

Entreprise
0 977 215 105
http://www.cadlink.fr/contact/
20 rue Nungesser et Coli 91420
Morangis, France
Technologies clés : 9

CADVision

Entreprise
01 39 30 65 06
info@cadvision.fr
2, rue GALILEE 78280 Guyancourt
Technologies clés : 9

CEA IG

Institut de génomique
Académie
01 60 87 83 44
cng-enquiries@cng.fr
2, rue Gaston Crémieux 91057 EVRY
Technologies clés : 8

Collectis Bioresearch

filiale de Collectis
Entreprise

01 41 83 99 36
business-development@collectis-
bioresearch.com
102 Route de Noisy,
93230 Romainville
Technologies clés : 29

CellForCure

Entreprise
01 69 82 70 10
http://www.cellforcure.com/en/pages/
contact
3, avenue des Tropiques Z.A.
de Courtaboeuf 91940 LES ULIS
Technologies clés : 29

CellTechs

Académie
frank.yates@supbiotech.fr
66 rue Guy Môquet
94800 Villejuif
Technologies clés : 29

Centre de Mathématiques Appliquées

Académie
01 69 33 46 00
debouard@cmap-polytechnique.fr
CMAP UMR 7641 École Polytechnique
CNRS, Route de Saclay, 91128
Palaiseau Cedex
Technologies clés : 4

Centre de Neuro-Imagerie de Recherche

plateforme d'imagerie de l'Institut
du Cerveau et de la Moelle épinière
- ICM
Académie
01 57 27 40 00
contact@icm-institute.org
http://icm-institute.org/fr/contact/
47, bd de l'hôpital 75013 PARIS
Technologies clés : 14

Cequami

Entreprise
l.posenel@cequami.fr
http://www.cequami.fr/pour-les-pros/
neuf/obtenir-les-certifications/
4 Avenue du Recteur Poincaré
75016 PARIS
Technologies clés : 39

Ceraver

Entreprise
01 48 63 88 63
CERAVER PARIS NORD 2 : 69, Rue
de la belle étoile B.P. 54263 GONESSE
95957 Roissy cdg Cedex
Technologies clés : 31

Cerqual

Entreprise
http://www.qualite-logement.org/
contact.html
1 Rue de Metz
75010 Paris
Technologies clés : 39

Certivea

Entreprise
01 40 50 29 09
http://www.certivea.fr/contact
4 Avenue du Recteur Poincaré
75016 Paris
Technologies clés : 39

CETH2

Entreprise
R&D
0 1 79 36 02 82
contact@ceth.fr
http://www.ceth.fr/contacts.php?PHP
SESSION=72d8a879c0db2191cdd0a61
331d07812
Zone Industrielle de la Prairie - 10, rue
de la Prairie 91140 VILLEBON-SUR-
YVETTE
Technologies clés : 25

CGG

Entreprise
01 64 47 30 00
27 Avenue Carnot 91341 Massy
Cedex
Technologies clés : 15

CHAPPEE

filiale de BDR THERMEA Group
Entreprise
preco@chappee.com

157 avenue Charles Floquet
93158 Le Blanc Mesnil Cedex
Technologies clés : 40

CHART

Laboratoire Cognitions Humaine
et Artificielle
Académique
01 49 40 64 79
baccino@lutin-userlab.fr
2 rue de la Liberté
93526 SAINT-DENIS, France
Technologies clés : 19

CITEL

Entreprise
01 41 23 50 23
http://www.citel.fr/fr/contact.html
2 rue Troyon 92316 Sèvres CEDEX
Technologies clés : 40

CMLA

Laboratoire de mathématiques
appliquées de l'ENS Cachan/CNRS
Académique
01 47 40 59 00
http://www.cmla.ens-
cachan.fr/jsp/contact_mail.
jsp?CODE=fdevuyt&LANGUE=0&ID_
OBJET=31206&TYPE_OBJET=ANNUAL
REKSUP&RH=1216281082650
CMLA - ENS Cachan - bât. Laplace,
1^{er} étage, 61 av. du président Wilson
94235 CACHAN cedex
Technologies clés : 11

CNAM

Conservatoire National des Arts
et Métiers
Académique
01 40 27 23 30
292 Rue Saint-Martin, 75003 Paris
Technologies clés : 9

CNIM

Entreprise
babcock@cnim.com
http://www.cnim.com/contacts.aspx
9 rue Francis de Pressensé
93 210 La Plaine Saint-Denis
Technologies clés : 41

CNR

Entreprise
cnr.lyon@cnr.tm.fr
http://www.cnr.tm.fr/contact.aspx
28 Boulevard Raspail, 75007 Paris
Technologies clés : 42

Cofely Ineo

filiale d'Engie
Entreprise
http://www.cofelyineo-gdfsuez.com/
contact
1, Place des Degrés, Tour Voltaire
92059 Paris la Défense
Technologies clés : 5, 22, 25

Cofely Services (Groupe Suez Environnement)

Entreprise
01 41 20 10 00
1 place des degrés 92059 Paris
La Défense
Technologies clés : 36

CogLab

Recherche
http://www.coglab.fr/contact/
La Paillasse - 226 rue Saint-Denis
75002 Paris
Technologies clés : 19

Criteo

Entreprise
01 40 40 22 90
http://www.criteo.com/fr/contact-us/
32 rue Blanche 75 009 Paris
Technologies clés : 3

CTICM

Centre Technique Industriel
de la Construction Métallique
CTI
01 60 13 83 00
Espace technologique, L'orme
de merisiers, Immeuble Apollo 91193
Saint-Aubin
Technologies clés : 38

CTIF

Centre Technique Industriel Fonderie
CTI

01 41 14 63 00
http://www.ctif.com/contact-ctif/
44 avenue de la Division Leclerc
F-92318 SEVRES CEDEX
Technologies clés : 1

CTMNC

Centre technique de matériaux
naturels de construction
CTI
01 44 37 07 10
ctmnc@ctmnc.fr
17, rue Letellier 75015 Paris
Technologies clés : 39

Curie Cancer

Institut Carnot
01 69 86 30 00
Centre Universitaire - Bâtiments 110,
111, 112 91405 Orsay
Technologies clés : 15

CybelAngel

Start-up
contact@cybelangel.com
177 RUE DE LOURMEL 75015 Paris
Technologies clés : 34

DAMAE MEDICAL

Start-up
01 72 60 51 13
info@damaemedical.fr
96 bis boulevard Raspail 75006 Paris
Technologies clés : 14

Danone

Entreprise
R&D
01 69 35 70 00
danonecorporate@danone.com
Avenue de la Vauve, 91120 Palaiseau
Technologies clés : 28

Dataiku

Start-up
01 84 17 45 90
https://www.dataiku.com/dss/contact/
2 rue Jean Lantier 75001 Paris
Technologies clés : 3

Derichebourg

Entreprise
01 44 75 40 40
communication@derichebourg.com
119, Av. du Général Michel Bizot
75579 PARIS Cedex 12
Technologies clés : 44

Dietswell

Entreprise
01 39 30 21 60
contact@dietswell.com
Parc Ariane 3 - Immeuble Le
Naïade - 1 rue Alfred Kastler 78284
Guyancourt Cedex
Technologies clés : 15

Diotasoft

Entreprise
01 78 90 02 02
contact@diotasoft.com
http://www.diotasoft.com/
15 avenue Emile Baudot 91300
MASSY
Technologies clés : 14

Docapost

Entreprise
01 56 29 70 01
http://www.docapost.com/contact/
Immeuble DOCAPOST
- 10 avenue Charles de Gaulle
94673 Charenton-le-Pont Cedex
Technologies clés : 33

Doris Engineering

Entreprise
01 44 06 10 00
http://www.doris-engineering.com/
prod/email.php
58A, rue du Dessous des Berges
75013 PARIS
Technologies clés : 15

E.ZICOM

Entreprise
01 43 89 25 79
http://www.e-zicom.com/contacts
1 Rue Leon Bocquet 94100 Saint
Maur des Fossés
Technologies clés : 12

EBIC

European Biostimulant Industry
Council
01 40 91 05 70
c/o Prospero & Partners - 34 rue
des Blondeaux - 94240 L'Hajÿ-les-Roses
Technologies clés : 27

Eblink

Entreprise
01 69 00 40 07
http://e-blink.com/more-services/
3-5, rue Marcel Pagnol 91800 Boussy-
Saint-Antoine
Technologies clés : 6

École des Gobelins

Académique
01 40 79 92 79
http://www.gobelins.fr/formulairebase/
formulairecontact
73 Boulevard Saint-Marcel, 75013
Paris
Technologies clés : 47

Ecomesure

Entreprise
01 70 56 44 00
info@comesure.com
4 Rue René Razel, 91400 Saclay
Technologies clés : 36

Effilux

Entreprise
01 69 35 87 56
contact@effilux.fr
EFFILUX
Bâtiment 503
Centre scientifique
BP 44
91 400
ORSAY CEDEX
Technologies clés : 2

Egis

Entreprise
01 39 41 40 00
http://www.egis.fr/contact
15 avenue du Centre CS 20538
Guyancourt 78286
Saint-Quentin-en-Yvelines CEDEX
Technologies clés : 37

Eisko

Entreprise
01 85 08 52 51
contact@eisko.com
Eisko, 24 rue de l'Est 75020 Paris
Technologies clés : 47

Ektos

Start-up
contact@ektos.fr
10 avenue Blaise Pascal 77420
Champs sur Marne
Technologies clés : 2

Ela Medical

Entreprise
01 53 94 73 73
4 Avenue Réaumur ZA Novéos 92140
CLAMART
Technologies clés : 31

ELVESYS

Start-up
01 84 16 38 06
contact@elvesys.com
49 rue Condorcet 75009 PARIS
Ile-de-France
Technologies clés : 18

Embedded France

Association
06 72 39 74 19
eric.lerouge@embedded-france.org
http://www.embedded-france.org/
contact-us/
148 Boulevard Haussman 75008 Paris
Technologies clés : 7

Emiota

Start-up
contact@emiota.com
16, rue de Picardie 75 003 Paris
Technologies clés : 5

Endentec (groupe Veolia)

Entreprise
01 45 11 55 55
http://www.endetec.com/fr/contacts/#
L'Aquarène - 1, place Montgolfier

94417 Saint-Maurice Cedex
Technologies clés : 36

Endocells

Entreprise
01 57 27 47 38
http://www.endocells.com/contact-us/
216 Bd Saint Germain Paris 75007
Technologies clés : 29

Enertime

Entreprise
01 75 43 15 40
http://www.enertime.com/fr/societe/
contact
1, rue du Moulin des Bruyères 92 400
COURBEVOIE
Technologies clés : 41

ENS Cachan - Département électronique électrotechnique automatique (EEA)

Académique
01 47 40 74 00
secretariat@eea.ens-cachan.fr
61, avenue du Président Wilson
94235 Cachan cedex
Technologies clés : 46

ENSAE

École Nationale de la Statistique
et de l'Administration Economique
Académique
01 41 17 65 25
info@ensae
3, avenue Pierre Larousse 92245
MALAKOFF Cedex
Technologies clés : 3

EOS Imaging

Entreprise
01 55 25 60 60
contact@eos-imaging.com
10 rue Mercœur 75011 Paris
Technologies clés : 14

EOS Innovation

Entreprise
01 84 18 04 29
contact@eos-innovation.fr
10 Avenue Arago 91380 Chilly
Mazarin
Technologies clés : 12

Erasteel

Entreprise
01 45 38 63 00
infofrance@eramet-erasteel.com
Tour Maine Montparnasse
33 Avenue du Maine
75 755 PARIS CEDEX 15
Technologies clés : 9

Entreprise
01 80 38 41 32
http://www.ereie-sas.fr/contact/
3, rue de la Croix Martre - 91120
Palaiseau
Ile-de-France
Technologies clés : 41

Esi Group

Entreprise
01 49 78 28 00
https://www.esi-group.com/fr/
entreprise/contactez-nous
99 rue des Solets 94513 Rungis
Technologies clés : 4

Etelm

Entreprise
01 69 31 79 00
http://www.etelm.fr/index.
php?option=com_qcontacts&view
=contact&id=1&Itemid=57&lang=fr
9 avenue des deux Lacs - P.A. de
Villejust 91971 Courtaboeuf cedex
Technologies clés : 13

Eurofins

Entreprise
01 69 10 88 97
info-eu@eurofins.com
http://www.eurofinsgenomics.eu/
en/eurofins-genomics/service-center/
contact-us/contact-form.aspx
9, avenue de Laponie
Les Ulis
F-91978 Courtaboeuf Cedex
Technologies clés : 26

Ex@tech - Exascal

Académique

<http://www.istem.eu/contacts/>
Genopole Campus 1, 5 rue Henri
Desbruères 91030 EVRY Cedex
Technologies clés : 29

ITAI IFIP

Institut du Porc
ITAI
01 58 39 39 50
ifip@ifip.asso.fr
5, rue Lespagnol 75020 Paris
Technologies clés : 28

Kalray

Entreprise
01 84 00 00 45
<http://www.kalray.eu/kalray/contact-us/>
<http://www.kalray.eu/kalray/contact-us/>
86 rue de Paris 91400 Orsay
Technologies clés : 46

Keyrus

Entreprise
01 41 34 10 00
<http://www.keyrus.com/keyrus/general-informations/contact/id/40694>
155 rue Anatole France 92593
Levallois-Perret Cedex
Technologies clés : 3

Ile-de-France

Kidova

Entreprise
01 47 09 09 49
contact@kidova.com
155 avenue Roger Salengro, F-92370
Chaville
Technologies clés : 37

Laboratoire MMN

Microfluidique, Mems, Nanostructures
Académie
01 40 79 51 90
ESPCI
10, rue Vauquelin
75005 Paris
Technologies clés : 18

Laboratoire SAMOVAR, Télécom

Sud-Paris/Institut Mines Télécom
Académie
walid.benameur@telecom-sudparis.eu
SAMOVAR UMR 5157
TELECOM Sudparis (ex INT)
9 rue Charles Fourier
91011 EVRY
Technologies clés : 34

Laster

Entreprise
01 77 06 70 94
contact@laster.fr
Zone d'Activité de Courtaboeuf - 7,
avenue de l'Atlantique - Bât. A - 2eme
ét.-91969 COURTABOEUF CEDEX
Technologies clés : 14

LCMCP (Paris)

Laboratoire de Chimie de la Matière
Condensée de Paris
Académie
01 44 27 15 08
Collège de France, Bat. C-D, 11 place
Marcelin Berthelot 75231 PARIS
Cedex 05
Technologies clés : 23

Leosphere

Entreprise
01 81 87 05 00
info@leosphere.com
<http://www.leosphere.com/contact-leosphere-wind-measurement-lidar>
16 rue Jean Rostand
91400 Orsay
Technologies clés : 2

LIGM (UPEM)

Académie
01 60 95 75 00
5 boulevard Descartes - Champs-
sur-Marne - 77454 Marne-la-Vallée
Cedex 2
Technologies clés : 19

LIMS1

Laboratoire d'Informatique
pour la Mécanique et les Sciences
de l'Ingénieur
Académie
01 69 85 80 80

contact@limsi.fr

Rue John von Neumann - Campus
Universitaire d'Orsay - Bât 508 -
91405 ORSAY CEDEX
Technologies clés : 19

LIX - École Polytechnique

Laboratoire d'Informatique de l'École
Polytechnique
Académie
01 77 57 80 30
UMR 7161 - 1 rue Honoré d'Estienne
d'Orves - Bâtiment Alan Turing
- Campus de l'École Polytechnique -
91120 Palaiseau
Technologies clés : 21

LNE

Laboratoire national de métrologie
et d'essais
Académie
01 40 43 37 00
info@lne.fr
1, rue Gaston Boissier - 75724 Paris
Cedex 15
Technologies clés : 36

Logic Instrument

Start-up
01 39 35 61 61
France@logic-instrument.com
43 Avenue de l'Europe, BP60012,
95331 DOMONT cedex
Technologies clés : 13

LPICM

Laboratoire de Physique des Interfaces
et Couches Minces
Académie
01 69 33 43 03
pere.roca@polytechnique.edu
École Polytechnique
Route de Saclay
91128 Palaiseau
Technologies clés : 42

LPN

Laboratoire de Photonique
et de Nanostructures
Académie
01 69 63 60 55
contact@lpn.cnrs.fr
LPN-CNRS - Route de Nozay 91460
MARCOUSSIS
Technologies clés : 46

LSV

Laboratoire specification et vérification
(LSV)
Académie
0 1 47 40 75 20
61, avenue du Président Wilson
94235 CACHAN Cedex, France
Technologies clés : 20

LTCI

Laboratoire Traitement et
Communication de l'Information
Académie
olivier.cappe@telecom-paristech.fr
CNRS LTCI
Télécom ParisTech
46 rue Barrault
F-75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 11

Luceor

Entreprise
01 47 36 22 80
contact@luceor.com
2, Place Jules Gévelot 92138 Issy-les-
Moulineaux Cedex
Technologies clés : 13

MacGuff

Entreprise
01 53 58 46 46
6 rue de la Cavalerie 75015 Paris
Technologies clés : 47

Madea concept

Entreprise
01 60 66 31 20
contact@madeaconcept.com
Pôle d'activités de Melun Villaroche
- Chemin de Viery 77550 Limoges
Fourches
Technologies clés : 4

MathWorks

Entreprise
01 41 14 87 00

Les Montalets - 2 rue de Paris 92190
Meudon

Technologies clés : 4

Mauna Kea Technologies

Entreprise
01 48 24 03 45
<http://www.maunakeatech.com/fr/content/contactez-nous>
9, rue d'Enghien 75010 Paris
Technologies clés : 14

Maurel & Prom

Entreprise
contact@maureletprom.fr
51, rue d'Anjou
75008 Paris
Technologies clés : 15

Mercenaries Engineering

Entreprise
01 80 05 30 42
contact@mercenaries-engineering.com
84 AVENUE DE LA REPUBLIQUE 75011
PARIS
Technologies clés : 47

Mersen

Entreprise
01 46 91 54 00
Immeuble La Fayette - 2, place
des Vosges F-92051 La Défense Cedex
Technologies clés : 42

MetaGenoPolis

Académie
contact@mgps.com
<http://mgps.eu/new/index.php?id=accueil#contact>
MetaGenoPolis 78350 Jouy-en-Josas
Technologies clés : 28

Metrohm France

Entreprise
01 64 86 97 00
13, Avenue du Québec - CS 90038 -
91 978 Villebon Courtaboeuf
Technologies clés : 36

MIKROS Images

Entreprise
01 55 63 11 00
120 Rue Danton, 92300 Levallois-
Perret - France
Technologies clés : 47

Millidrop

Start-up
contact@millidrop.com
10 RUE VAUQUELIN 75005 PARIS
Technologies clés : 18

Mines ParisTech

Académie
01 40 51 92 45
recherche@mines-paristech.fr
60, boulevard Saint-Michel 75272
Paris cedex 06
Technologies clés : 7

Mines Telecom

Académie
01 45 81 80 80
<http://www.mines-telecom.fr/contacts-access/>
46 rue Barrault 75634 Paris Cedex 13
Technologies clés : 13

Mircean

Molecular Imaging Research Center
Académie
01 46 54 84 11
CEA-Fontenay-aux-Roses Bâtiment
61 - 18, route du Panorama 92265
Fontenay-aux-Roses cedex
Technologies clés : 14

Mirsense

Start-up
http://mirsense.com/?page_id=33
BATIMENT ERABLE
86 RUE DE PARIS
91400 ORSAY
Read more at <http://www.societe.com/societe/mirsense-809229750.html#LLXIVOWr3fk7IUUsM.99>
Technologies clés : 46

Morpho

Entreprise
01 58 11 25 00
info@morpho.com
11, boulevard Gallieni 92130 - Issy-les-

Moulineaux
Technologies clés : 34

Motiontree

Entreprise
contact@motiontree.net
8 rue Georges Duhamel - 242 75015
PARIS
Technologies clés : 47

Murex

Entreprise
01 44 05 32 00
8 rue Bellini 75016 Paris
Technologies clés : 4

My Brain Technologies

Start-up
contact@mybraintech.com
<http://www.melomind.com/fr/contact/>
63 RUE BLANCHE 75009 PARIS
Technologies clés : 5

Neodyss

Start-up
06 64 75 21 17
info@neodyss.com
54, rue Nicolo 75116 Paris
Technologies clés : 15

Neovacs

Entreprise
01 53 10 93 00
<http://neovacs.fr/contact/>
3-5, Impasse Reille 75014 PARIS
Technologies clés : 15

Nexas

Entreprise
01 55 62 70 00
4-10 rue Mozart 92587 Clichy cedex
Technologies clés : 43

Nova Watt

Entreprise
01 70 82 11 70
contact@novawatt.com
La Grande Arche - Paroi NORD - 1,
Parvis de la Défense 92800 PUTEAUX
Technologies clés : 22

Numericable

Entreprise
01 64 61 14 04
10 RUE ALBERT EINSTEIN 77420
CHAMPS SUR MARNE
Technologies clés : 6

Oberthur

Entreprise
01 78 14 70 00
420, rue d'Estienne d'Orves 92700
Colombes
Technologies clés : 34

Observatoire de la qualité de l'air

intérieur
OQAI
entreprise
01 64 68 82 66
contact@oqai.fr
Centre Scientifique et Technique
du Bâtiment 84, avenue Jean Jaurès -
Champs sur Marne 77447 Marne
la Vallée Cedex 2
Technologies clés : 36

Opentrust

Entreprise
01 55 64 22 00
<https://www.opentrust.com/contact/>
175, rue Jean-Jacques Rousseau CS
70056 92138 Issy-les-Moulineaux
Cedex
Technologies clés : 34

Optics Valley

Cluster
01 69 31 75 00
35 boulevard Nicolas Samson, 91120
Palaiseau
Technologies clés : 2

Orange Labs

Entreprise
R&D
01 45 29 44 44
38-40, rue du Général Leclerc 92130
Issy-les-Moulineaux
Technologies clés : 11

Orchidis

Entreprise
01 55 09 10 10

<http://www.orchidis.com/fr/contact.php>
90, Rue du professeur Paul Milliez ZI des Nations 94506 CHAMPIGNY SUR MARNE
Technologies clés : 36

Ortholine France
Entreprise
01 43 56 33 50
106 Rue de Charenton, 75012 Paris
Technologies clés : 31

Owi
Entreprise
contact@owi-tech.com
31, avenue du Général Leclerc 92340 Bourg-la-Reine
Technologies clés : 19

Partnering Robotics
Entreprise
info@partnering.fr
4, Rue du lendemain - 95800 Cergy
Technologies clés : 12

PECSA - Laboratoire Physicochimie des Electrolytes, Colloïdes et Sciences Analytiques
Académique
veronique.peyre@upmc.fr
Université Pierre et Marie Curie/CNRS UMR79 - 4, place Jussieu 75005 Paris
Technologies clés : 23

Perenco
Entreprise
01 53 57 66 00
7 rue de Logelbach 75017 Paris
Technologies clés : 15

Pertimm
Entreprise
01 47 33 88 49
web-contact@pertimm.com
51 boulevard Voltaire 92600 Asnières-sur-Seine
Technologies clés : 19

Phytoestore
Entreprise
01 43 72 38 00
info@phytoestore.com
146 Boulevard de Charonne 75020 Paris
Technologies clés : 37

Pierre Fabre
Entreprise
01 53 53 20 50
Avenue Hoche 75008 Paris
Technologies clés : 8

Pixium vision
Entreprise
01 76 21 47 30
infos@pixium-vision.com
74 rue du Faubourg Saint-Antoine, 75012 Paris
Technologies clés : 31

Plateforme de la filière automobile
Recherche
01 41 44 94 30
<http://www.pfa-auto.fr/index.php/contact/>
79 rue JJ Rousseau 92150 Suresnes
Technologies clés : 20

Poly-Ink
Entreprise
01 41 11 45 10
contact@poly-ink.fr
27, Boulevard Louise Michel 92230 Gennevilliers
Technologies clés : 1

Precogs Software
Start-up
01 84 16 09 86
33 RUE ALBERT THOMAS - Paris 75010
Technologies clés : 3

Prescom
Entreprise
01 30 85 55 55
<http://www.prescom.fr/compagnie/nous-contacter/>
3 rue Michael Faraday F-78180 Montigny le Bretonneux
Technologies clés : 13

PRISM
Académique
01 39 25 40 77
chantal.ducoin@uvsq.fr
Université de Versailles St Quentin 45, avenue des États-Unis F-78035 VERSAILLES CEDEX
Technologies clés : 21

Prodways
Entreprise
01 30 90 44 12
<http://www.prodways.com/nous-contacter/>
ZI Les Garennes 1/3 rue Chappe, 78130 Les Mureaux
Technologies clés : 9

Projet LiveGrid
Académique
consortium regroupant : Université Paris-Saclay, EDF, CEA...
<http://www.livegrid.fr/contact.html>
6, boulevard Dubreuil 91400 Orsay
Technologies clés : 22

PS2E
Paris-Saclay Efficacité Énergétique ITE
01 39 07 62 62
contact@institut-ps2e.com
1, chemin de la porte des loges - BP 126 Les Loges-en-Josas 78354 Jouy-en-Josas Cedex
Technologies clés : 41

Qualibat
Association
01 47 04 26 01
55 avenue Kléber 75784 PARIS Cedex 16
Technologies clés : 39

Quantic Dream
Entreprise
01 44 64 00 90
54 boulevard DAVOUT 75020 Paris
Technologies clés : 47

Radiall
Entreprise
01 49 35 35 35
info@radiall.com
25, Rue Madeleine VIONNET 93300 AUBERVILLIERS
Technologies clés : 46

RedBird
Entreprise
01 84 16 52 01
contact@redbird.fr
130 rue de Lourmel, 75015 Paris
Technologies clés : 12

Rivale
Entreprise
01 47 76 32 66
7-9 rue Paul Lafargue - La Défense 92800 Puteaux
Technologies clés : 27

SAFT
Entreprise
01 49 93 19 18
12 rue Sadi Carnot 93170 Bagnolet
Technologies clés : 23

Sagemcom R&D
Entreprise
01 57 61 10 00
switchboard@sagemcom.com
250 route de l'Empereur 92848 Rueil-Malmaison Cedex
Technologies clés : 22

Saipem
Entreprise
01 61 37 88 88
contact@saipem-sa.com
7 Avenue de San Fernando, 78180 Montigny-le-Bretonneux
Technologies clés : 43

Saur
Entreprise
01 30 60 84 00
1, rue Antoine Lavoisier 78280 - GUYANCOURT
Technologies clés : 35

Scienomics
Entreprise
<http://scienomics.com/contact/general-inquiry>
16, rue de l'Arcade 75008 Paris, France
Technologies clés : 4

Sculpteo
Entreprise
01 83 64 11 22
10 Rue Auguste Perret 94800 Villejuif
Technologies clés : 9

Secomam
Entreprise
01 55 09 10 10
90, rue du Professeur P. Milliez 94506 Champigny/Marne
Technologies clés : 36

Segula
Entreprise
01 41 39 44 00
17/23, rue d'Arras - 92000 NANTERRE
Technologies clés : 20

Sen.se
Entreprise
01 40 11 15 93
touch@sen.se
34 Av. des Champs-Élysées, Bâtiment A - 3^e étage, 75008 Paris
Technologies clés : 5

Serious Factory
Entreprise
01 70 71 98 40
contact@seriousfactory.com
4, rue Gustave Flourens 92150 Suresnes
Technologies clés : 4

Servier
Entreprise
01 55 72 60 00
<http://www.servier.fr/contact>
50 rue Carnot 92284 Suresnes
Technologies clés : 29

Sevenhugs
Entreprise
01 46 57 79 61
contact@seven-hugs.com
21 bis rue des Citeaux - 92130 Issy les Moulineaux
Technologies clés : 5

Silex International
Entreprise
01 30 37 00 00
info@silexinternational.com
63, chemin de la Chapelle Saint Antoine - Zone d'Activités - 95300 ENNERY
Technologies clés : 37

Simpulse
Entreprise
09 52 63 65 85
contact@simpulse-dsp.com
7 rue de la Croix Martre 91120 Palaiseau
Technologies clés : 6

SNCF
Entreprise
com.recherche@sncf.fr
45 rue de Londres 75379 Paris
Technologies clés : 45

Snecma
Entreprise
01 69 87 09 00
10, allée du Brévent CE 1420 Courcouronnes 91019 Evry Cedex
Technologies clés : 9

Snips
Entreprise
contact@snips.net
8 rue Edouard Lockroy 75011 Paris
Technologies clés : 11

Société Française de Radiologie
Académique
01 53 59 59 69
sfr@sfradiologie.org
20, av. Rapp - F-75007 Paris
Technologies clés : 14

Socotec
Entreprise
01 30 12 80 00

Les Quadrants - 3 avenue du Centre - CS 20732 - Guyancourt 78182 St-Quentin-en-Yvelines Cedex
Technologies clés : 37

Sofradir
Entreprise
01 60 92 18 30
Avenue de la Vauve - CS20018, 91127, PALAISEAU
Technologies clés : 2

Sogeti High Tech
Recherche
01 40 93 73 00
infohightech@sogeti.com
2-10 rue Marceau 92136 Issy Les Moulineaux
Technologies clés : 20

Sol Environnement
Entreprise
01 47 76 55 90
22-24 rue Lavoisier, Bât B 92000 Nanterre
Technologies clés : 37

Soléo Services
Entreprise
01 39 29 75 70
<http://www.soleo-services.fr/soleo-services/contact-soleo/>
ZAC des Chevries 11 rue des Chevries 78410 Aubergenville
Technologies clés : 37

SolidAnim
Entreprise
01 46 70 96 43
<http://www.solidanim.com/contact/>
52 avenue Pierre Sémard 94200 Ivry Sur Seine
Technologies clés : 47

Spectralys
Entreprise
01 41 50 67 70
102 Avenue Gaston Roussel, 93230 Romainville
Technologies clés : 2

Spirops
Entreprise
R&D
01 48 05 10 98
contact@spirops.com
8, passage de la bonne graine 75011 Paris
Technologies clés : 11

Spring Technologies
Entreprise
01 43 60 25 00
Immeuble Le Méliès - 261, rue de Paris - 93556 Montreuil Cedex
Technologies clés : 4

Stanley Robotics
Entreprise
contact@stanley-robotics.com
13 Rue Saint-Honoré 78000 Versailles
Technologies clés : 12

Starbreeze
ex-Infiniteye
Entreprise
ir@starbreeze.com
10 RUE DES 3 PORTES 75005 PARIS France
Ile-de-France
Technologies clés : 14

Stilla Technologies
Entreprise
01 69 33 52 87
info@stilla.fr
Ecole Polytechnique 91128, Palaiseau
Technologies clés : 18

Stratecollege
Académique
01 46 42 88 77
27, avenue de la Division Leclerc 92310, Sèvres
Technologies clés : 47

Structure et Computation
Entreprise
contact@structure-computation.com
86 rue de Paris, 91400 Orsay
Technologies clés : 4

Suez - CIRSEE

Centre International de Recherche Sur l'Eau et l'Environnement
Académique
01 34 80 23 45
38, rue du Président Wilson 78 230
Le Pecq
Technologies clés : 2

Sun'R

Entreprise
01 53 81 03 15
<http://www.jotforme.com/sunr/>
contact-autres
7 Rue Clichy, 75009 Paris
Technologies clés : 42

Syllabs

Start-up
01 55 28 67 34
hello@syllabs.com
26 rue Notre-Dame de Nazareth
75003 Paris
Technologies clés : 3

Teratec

Pôle européen de compétence en simulation numérique haute performance
Entreprise
R&D
09 70 65 02 10
infos@teratec.fr
<http://www.teratec.eu/info/contacts.html>
Campus Teratec - 2, rue de la piquetterie 91680 BRUYERES-LE-CHATEL, France
Technologies clés : 21

Texcell

Entreprise
01 60 91 33 10
info@texcell.com
GENAVENIR 5 1, Rue Pierre Fontaine
F-91058 EVRY Cedex
Technologies clés : 29

Très Grand Centre de Calcul - CEA

Académique
09 70 65 02 10
infos@teratec.fr
Campus Teratec, 2, rue de la piquetterie 91680 BRUYERES-LE-CHATEL
Technologies clés : 21

Trinov

Entreprise
01 70 61 19 40
info@trinov.com
37 rue Guersant 75017 Paris
Technologies clés : 4

Ubisoft

Entreprise
01 48 18 50 00
28 rue Armand Carrel 93108
Montreuil-sous-Bois
Technologies clés : 47

UFIP

Union Française de l'Industrie Pétrolière
Fédération professionnelle
01 40 53 70 00
4, avenue Hoche, 75008 Paris
Technologies clés : 15

Umanlife

Entreprise
01 40 54 99 65
contact@umanlife.com
2, rue Meissonier 75017 Paris
Technologies clés : 33

United Biometrics

Entreprise
contact@unitedbiometrics.com
ORSAY PARC
86 rue de Paris
91400 ORSAY
Technologies clés : 34

Valgo

Entreprise
01 56 43 64 50
<http://www.valgo.com/fr/Contact/>
Contactez-nous/id_61
25 rue de Ponthieu - Bât C - 4^{ème} étage - F-75008 PARIS
Technologies clés : 37

VeDeCoM

IRT
01 30 97 01 80
<http://vedecom.fr/fr/contactez-nous.html>
77 rue des Chantiers, 78000 Versailles
Technologies clés : 45

Vinci Construction

Entreprise
01 46 95 70 00
61 Avenue Jules Quentin, 92000
Nanterre
Technologies clés : 39

Viotech

Entreprise
09 81 91 93 31
Contact@viotech.net
13 rue Saint Honoré 78000 Versailles
Technologies clés : 20

Voir et Entendre

Institut Carnot
01 53 46 26 48
17 rue Moreau 75012 Paris
Technologies clés : 19

Voitalia

Entreprise
01 44 63 14 40
http://www.voitalia.com/fr/contact_81.html
28 rue de Mogador 75009 Paris
Technologies clés : 43

Voltais

Entreprise
01 49 06 47 00
contact@voltalis.com
Tour Franklin - 100/101 Terrasse
Boieldieu 92042 PARIS LA DEFENSE
Technologies clés : 22

Wandercraft

Start-up
<http://www.wandercraft.eu/contacts.html>
Incubateur de l'École Nationale Supérieure des Arts & Métiers - 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris
Technologies clés : 10

Watchfrog

Entreprise
01 69 36 11 15
info@watchfrog.fr
4 RUE PIERRE FONTAINE / 91000 ÉVRY
Technologies clés : 26

Zodiac Aerospace

Entreprise
01 61 34 23 23
<http://www.zodiacaerospace.com/fr/contact>
61 rue Pierre Curie - CS20001 - 78373
Plaisir Cedex
Technologies clés : 20

BPI Ile-de-France - Paris

BPI
01 53 89 78 78
<http://contact.bpifrance.fr/#>
6/8, boulevard Haussmann 75009
Paris
Technologies clés :

BPI Ile-de-France - Est

Ile de France Est
BPI
01 48 15 56 55
<http://contact.bpifrance.fr/#>
16, boulevard du Mont d'Est Maille
Nord IV - Hall 41 93192 Noisy-le-Grand Cedex
Technologies clés :

BPI Ile-de-France - Ouest

Ile de France Ouest
BPI
01 46 52 92 00
<http://contact.bpifrance.fr/#>
La Grande Arche - Paroi Nord 1, parvis
de la Défense 92044 Paris La Défense
Cedex
Technologies clés :

AGORANOV

Incubateur
01 44 18 07 15
jean-michel.dalle@upmc.fr

96 bis boulevard Raspail
75006 Paris

Technologies clés :**IDF Innov**

SATT
01 44 23 21 50
contact@idfinnov.com
37 rue de Lyon, 75012 Paris
Technologies clés :

Incuballiance

Incubateur
01 77 93 21 01
p.moreau@incuballiance.fr
Orsay Parc - Bâtiment Erable
86 rue de Paris
91400 Orsay
Technologies clés :

Institut de soudure

CTI
http://www.isgroupe.com/fr/Contacts/_layouts/IS/ContactForm.aspx?language=fr
90 Rue des Vanesses, 93420 Villepinte
Technologies clés :

PARIS BIOTECH SANTÉ

Incubateur
01 53 10 53 53
amedeemesme.o@parisbiotech.org
Université Paris 5 René Descartes
Faculté de médecine Cochin Port Royal
24 rue du Faubourg Saint Jacques
75014 Paris
Technologies clés :

SATT Paris-Saclay

SATT
contact@satt-paris-saclay.fr
<http://satt.e-monsite.com/contact/demande-de-renseignements.html>
24, boulevard de l'Hôpital
75005 PARIS
Technologies clés :

Inserm IdF (u951)

Académique
01 69 47 29 93
<http://www.idf.inserm.fr/contact>
1 bis rue de l'Internationale
91002 Evry
Technologies clés : 26

Balyo

Entreprise
01 55 26 43 10
<http://www.balyo.com/fr/Contact>
170 Rue Raymond Losserand, 75014
Paris
Technologies clés : 10

Eolfi

Filiale du groupe Véolia
Environnement
Entreprise
0 1 40 07 95 00
contact@eolfi.com
<http://www.eolfi.com/fr/contact.htm>
12 rond-point des Champs-Élysées
75008 PARIS
Technologies clés : 43

Deezer

Entreprise
01 55 80 69 00
cantact-fr@deezer.com
12 rue d'Athènes 75009 Paris
Technologies clés :

Dailymotion Paris

Entreprise
01 77 35 11 00
140 boulevard Malesherbes
75017 Paris
Technologies clés :

Le Labo de l'édition

Entreprise
01 83 64 89 00
labodeledition@parisregionlab.com
2, rue Saint-Médard
75005 Paris
Technologies clés :

ICCA

Industries Culturelles et Création
Artistique
Académique
Labex
01 49 40 30 00
labex.icca@univ-paris13.fr

Université Paris 13
99, Avenue Jean-Baptiste Clément
93 430 Villetaneuse

Technologies clés :**IREST**

Institut de recherche et d'études supérieures du tourisme
Académique
01 79 41 90 17
dirirect@univ-paris1.fr
16 boulevard Carnot 93340 BOURG
LA REINE
Technologies clés :

Patrima

Académique
Labex
fondation.patrima@gmail.com
33, boulevard du Port
95011 Cergy-Pontoise Cedex
Technologies clés :

CEISME

Centre d'Étude sur les Images et les Sons médiatiques
Académique
01 45 87 79 50
francois.jost@univ-paris3.fr
Université Sorbonne Nouvelle - Paris 3
1, rue Censier 3^e étage
75005 Paris
Technologies clés :

IRCAV

Institut de recherche sur le cinéma et l'audiovisuel
Académique
01 45 87 79 88
ircav@univ-paris3.fr
Université Sorbonne Nouvelle - Paris 3
Centre Censier 13, rue Santeuil
75231 Paris Cedex 05
Technologies clés :

LABSIC

Laboratoire des Sciences de l'Information et de la Communication
Académique
legendre.bertrand@wanadoo.fr
<http://labsic.univ-paris13.fr/index.php/contacts/67-labsic/8-directeur-du-labsic>
UNIVERSITÉ PARIS 13
UFR des sciences de la communication
99, avenue Jean Baptiste Clément
93430 Villetaneuse
Technologies clés :

DIRECCTE Ile de France

DIRECCTE
01 70 96 17 05
idf-polec@direccte.gouv.fr
<http://www.idf.direccte.gouv.fr/accueil-31>
Pôle C 19 rue Madeleine Vionnet
Technologies clés :

La réunion

Qualitropic
Pôle de compétitivité
02 62 97 10 88
qualitropic@qualitropic.fr
http://www.qualitropic.fr/nous-contacter.php?postname_fr=nous-contacter
Quartier d'Affaires La Mare - Bât B - La Turbine - 5^{ème} niveau - 5 rue André Lardy 97438 Sainte-Marie
Technologies clés : 27, 28

DIECCTE La Réunion

DIECCTE
02 62 90 21 41
974-polec@dieccte.gouv.fr
<http://www.reunion.dieccte.gouv.fr/La-Reunion>
Rue Bois de Nègles 12, Lotissement Lemerle
Technologies clés :

Languedoc Roussillon

DIRECCTE Languedoc Roussillon
DIRECCTE
04 67 22 88 88
lrouss-polec@direccte.gouv.fr
<http://www.languedoc-roussillon.direccte.gouv.fr/accueil-3>
Pôle C 615 Bd d'Antigone CS 19002
Technologies clés :

Derbi

Pôle de compétitivité
04 68 66 17 96
contact@pole-derbi.com
52 avenue Paul Alduy 66860
Perpignan Cedex
Technologies clés : 22, 24, 40, 42

CEA Marcoule

Académique
04 66 79 60 00
communication-marcoule@cea.fr
30200 Chusclan
Technologies clés : 4, 44

CED2 - CHIMIE BALARD

Chimie, Environnement et
Développement Durable
Académique
Institut Carnot
06 43 56 43 32
contact@carnot-chimie-balard.fr
École Nationale Supérieure de Chimie
de Montpellier, 8 rue de l'École
Normale 34296 Montpellier
cedex 5
Technologies clés : 1, 26

Deinove

Entreprise
04 48 19 01 00
http://www.deinove.com/fr/contact
Cap Sigma / ZAC Euromédecine II,
1682 rue de la Valsière 34790 Grabels
Technologies clés : 8, 26

ICSM

Institut de Chimie Séparative de
Marcoule
04 66 33 92 79
icsm@cea.fr
ICSM UMR 5257 – CEA / CNRS / UM2
/ ENSCM, Site de Marcoule, Bâtiment
426, BP 17171, F-30207 Bagnols Sur
Ceze Cedex
Technologies clés : 8, 44

INRA LBE

Laboratoire de biotechnologie
de l'environnement
Académique
04 68 42 51 51
lbe-contact@supagro.inra.fr
http://www6.montpellier.inra.fr/
narbonne/Contact
Avenue des Etangs. 11100 Narbonne
Technologies clés : 8, 24

Pôle EAU

Pôle de compétitivité
04 34 88 34 43
direction@pole-eau.com
http://www.pole-eau.com/
Informations/Contact
672 rue du Mas de Verchant 34000
Montpellier
Technologies clés : 35, 36

Apex Energies

Entreprise
04 99 62 26 22
contact@apexenergies.fr
256 rue de Thor 34000 Montpellier
Technologies clés : 42

Biophytec

Entreprise
06 24 41 33 07
http://www.biophytec.fr/contacts
4, rue du Grand Chêne - ZA des
Avants 34270 SAINT-MATHIEU-
DE-TREVIERS
Technologies clés : 27

Bodysens

Entreprise
09 72 45 08 42
442 Rue Georges Besse, Immeuble
Innovation 3, 30035 Nîmes
Technologies clés : 2

Dyneff

Entreprise
04 67 12 35 70
Stratégie Concept Bât.5 - 1300
Avenue Albert Einstein - CS 76033 -
34060 Montpellier Cedex
Technologies clés : 15

EDF EN

EDF Energies Nouvelles
Entreprise
R&D

04 67 09 82 00
http://www.edf-en.fr/vous-avez-un-
projet/
Centre Européen de Colombiers
10 rue de la Jasse
ZA Viargues
34440 Colombiers
Technologies clés : 43

ICG-AIME (Montpellier)

Agrégats, Interfaces et Matériaux
pour l'Énergie
Académique
04 67 14 33 41
lammi@univ-montp2.fr
ICGM - UMR5253- Equipe AIME
Université Montpellier 2
2 Place Eugène Bataillon
CC1502
34095 Montpellier CEDEX 5
Technologies clés : 23

Indatech

Entreprise
07 62 83 59 45
sales@indatech.eu
Z.A. La Plaine
4 rue Georges Besse
34 830 CLAPIERS
Technologies clés : 2

Izuba energies

Entreprise
04 67 18 31 10
contact@izuba.fr
35 rue Gine - Écoparc - 34690
FABRÈGUES
Technologies clés : 4

LFB Biomanufacturing

Entreprise
04 66 56 40 80
LFB-Biomanufacturing@lfb.fr
Impasse des Chênes Rouges 30319
Alès
Technologies clés : 26

LIRMM

Laboratoire d'informatique,
de robotique et de microélectronique
de Montpellier
Académique
04 67 41 85 85
Université Montpellier 2
LIRMM UMR 5506
CC477
161 rue Ada
34095 Montpellier Cedex 5
Technologies clés : 12

MACS

Matériaux avancés pour la catalyse
et la Santé, ICG Montpellier
Académique
04 67 16 34 62
Institut Charles Gerhardt Montpellier -
École Nationale Supérieure de Chimie
de Montpellier - Parc Euromédecine
104 Rue de la Galéra 34090
Montpellier Cedex 5
Technologies clés : 1

Medtech

Entreprise
04 67 10 77 40
http://medtech.fr/fr/contact
ZAC Euréka - 900, rue du Mas de
Verchant 34000 Montpellier
Technologies clés : 12

Neollia

Entreprise
04 67 16 34 98
info@neollia.com
8, rue de l'École Normale 34298
Montpellier
Technologies clés : 1

Oceasoft

Entreprise
04 99 13 67 30
126 Rue Emile Baudot, 34000
MONTPELLIER
Technologies clés : 2

Oreka Solutions

Entreprise
04 66 33 74 10
contact@orekasolutions.com
ZA de Berret 615 avenue
de la roquette 30200 Bagnols-sur-
Cèze
Technologies clés : 44

Phylogene

Entreprise
04 66 04 77 99
contact@phylogene.com
62 RN 113 30620 Bernis
Technologies clés : 18

Plateforme MGX

Montpellier Genomix
Académique
Bureau biologie moléculaire :
04 34 35 92 41
Bureau bioinformatique :
04 34 35 92 39
http://www.mgx.cnrs.fr/spip.
php?article12
c/o Institut de Génomique
Fonctionnelle
IGF-sud, Rez-de-chaussée, Bureaux
20 et 21
UMR 5203 CNRS – U 661 INSERM –
Université de Montpellier
141, rue de la cardonille
34094 MONTPELLIER Cedex 05
Technologies clés : 26

PROMES

PROcédés, Matériaux et Énergie
Solaire
Académique
04 68 30 77 00
7 rue du four solaire, ODEILO - 66120
FONT - ROMEU
Technologies clés : 41

Quadran

Entreprise
04 67 26 61 28
contact@quadran.fr
Domaine de Patau - Chemin
de Maussac-Patau 34420 VILLENEUVE-
LES-BÉZIERES
Technologies clés : 43

SEMCO Engineering

Entreprise
04 67 61 90 90
625 Rue De La Croix Verte, Parc
Euromédecine Cedex 5 - 34196
Montpellier
Technologies clés : 42

Tellmeplus

Entreprise
04 67 13 01 10
contact@tellmeplus.com
Cap Omega CS 39521 - 34960
Montpellier Cedex
Technologies clés : 11

T-Waves Technologies

Entreprise
09 72 44 13 81
Laboratoire Charles Coulomb
UMR 5221 CNRS-UM2, Université
Montpellier 2 – Bâtiment 13, Place
Eugène Bataillon – CC069, F-34095
Montpellier Cedex 5
Technologies clés : 2

Unelvent

Entreprise
04 68 53 02 60
unelvent@unelvent.com
ZI Côte Vermeille 66300 Thuir
Technologies clés : 40

Université de Montpellier

Centre HPC@LR
Centre de compétence Calcul Haute
Performance
Académique
04 67 14 47 89
hpc-lr.contact@univ-montp2.fr
Centre Informatique National
de l'Enseignement Supérieurbât. 10 -
Case courrier 00427
Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier Cedex 5
950 rue de Saint-Priest
34097 MONTPELLIER CEDEX 5
Technologies clés : 21

Inserm - Cellules souches, plasticité cellulaire, régénération tissulaire et immunothérapie des maladies inflammatoires

Académique
04 67 33 04 55
c-jorgensen@chu-montpellier.fr
Hopital Saint-Eloi
80 rue Auguste Fliche

34295 MONTPELLIER CEDEX 5
Technologies clés : 15

AxLR

SATT
04 67 04 75 00
contact@axlr.com
1 000, Avenue Agropolis
34394 Montpellier cedex 5
Technologies clés :

BPI Languedoc-Roussillon

BPI
04 67 69 76 00
http://contact.bpifrance.fr/#
Arche Jacques Cœur 222, place Ernest
Granier - CS 89015 34967 Montpellier
Cedex 2
Technologies clés :

LRI

Incubateur
04 67 14 49 85
philippe.gabrien@lr-incubation.com
Université Montpellier 2 – CC 483
Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier cedex 5
Technologies clés :

Qualiméditerranée

Pôle de compétitivité
04 67 04 75 56
info@qualimediterranee.fr
Agropolis International, 1000 Avenue
Agropolis 34394 Montpellier CEDEX 5
Technologies clés : 27, 28

Trimatec

Pôle de compétitivité
04 66 89 00 49
accueil@pole-trimatec.fr
http://www.pole-trimatec.fr/contact/
contacter
418, avenue Général de Gaulle 30130
PONT-SAINT-ESPRIT
Technologies clés : 8, 15

Novotek Industry

Entreprise
08 11 03 17 57
contact@novotek.fr
http://www.novotek.fr/contact/
CAP OMEGA
ROND POINT BENJAMIN FRANKLIN
CS 39521
34000 MONTPELLIER
Technologies clés : 40

Limousin**Legrand**

Entreprise
05 55 06 87 87
TASSIGNY, 128 AV MAL DE LATTRE
DE TASSIGNY, 87000 LIMOGES
Technologies clés : 2, 5, 40

CTTC

Centre de Transfert de Technologies
Céramiques
Association
05 55 42 61 50
contact@cttc.fr
Parc d'ESTER - 7, Rue Soyouz 87068
LIMOGES CEDEX
Technologies clés : 9

Domocreuse

Agence Publique
05 55 81 24 30
creuse@ecoute19.fr
11, rue des Sabots (place du Marché)
23000 Guéret
Technologies clés : 38

Elopsys

Pôle de compétitivité
05 87 21 21 60
elopsys@elopsys.fr
http://www.elopsys.fr/115/accueil/
article/contact
ELOPSYS - Centre d'Innovation
et de Recherche en Electronique -
12 rue Gemini, Bâtiment 2, 87068
Limoges Cedex
Technologies clés : 6

Emix

Entreprise
05 55 63 30 30
info@emix.fr
BP 90001 – Parc d'activités
de la Croisière 23300 St Maurice

La Souterraine

Technologies clés : 42

Id-Bio

Entreprise

05 55 35 05 35

info@idbio.eu

ESTER Technopole - 6 allée Skylab

87068 LIMOGES Cedex

Technologies clés : 8

Pôle Européen de la Céramique

Pôle de compétitivité

05 55 38 16 21

contact@cerameurop.com

ESTER Technopole 1 avenue d'Esther

87069 Limoges Cedex

Technologies clés : 1

Silab

Entreprise

05 55 84 58 40

silab@silab.fr

BP 213 - 19108 Brive Cedex France

Technologies clés : 8

Solumix

Entreprise

http://www.solumix.fr/contact/

contactez-nous/

Limoges B 798 546 453 - 5 allée

Gustave Eiffel 87410 LE PALAIS SUR

VIENNE

Technologies clés : 25

Avrul

Incubateur

05 55 35 77 03

matthieu.valetas@unilim.fr

ESTER Technopole

BP 6935

87069 Limoges cedex

Technologies clés :

BPI Limousin

BPI

05 55 33 08 20

http://contact.bpifrance.fr/#

7, rue Columbia Le Parc d'Esther - BP

76827 87068 Limoges

Technologies clés :

DIRECCTE LIMOUSIN

DIRECCTE

05 55 11 66 00

limou-polec@direccte.gouv.fr

http://www.limousin.direccte.gouv.fr/

accueil-20

Pôle C 2 allée Saint-Alexis BP 13203

Technologies clés :

Lorraine

IRT M2P

Matériaux Métallurgie et Procédés

IRT

03 72 39 50 85

contact(at)irt-m2p.fr

4 Rue Augustin Fresnel, 57070 Metz

Technologies clés : 1, 9, 16, 45

Glagla Shoes

Start-up

03 83 36 72 72

contact@glaglashoes.com

13, rue Héré - Place Stanislas 54000

Nancy

Technologies clés : 1, 2, 5

ICEEL

Institut Carnot Énergie et

Environnement en Lorraine

Institut Carnot

03 83 17 51 98

UPS-CNRS 3112 ENSIC / 1, Rue

Grandville / BP 20451, 54001 Nancy

Cedex

Technologies clés : 9, 23, 24

Materialia

Pôle de compétitivité

03 87 37 42 82

info@materialia.fr

Ciram - 4 Rue Augustin Fresnel 57070

Metz

Technologies clés : 1, 9, 16

Airboxlab/ Anaximen

Start-up

http://foobot.io/

12 Rue LEPOIS

54 000 NANCY

Technologies clés : 5, 36

Agrolor

Entreprise

03 83 98 86 61

17 Rue Laurent Bonnevay 54000

Nancy

Technologies clés : 27

Cirtes

Centre Européen de Développement

Rapide de Produit

Entreprise

03 29 55 11 71

info@cirtes.fr

36 bis, rue de la Bolle 88 100 Saint-

Dié-des-Vosges

Technologies clés : 9

GIFS

Groupement d'intérêt scientifique

sur les Fiches Industrielles

GIS

03 83 59 57 91

contact@gisfi.fr

2 avenue de la Forêt de Haye •

B.P. 172 • F-54505 Vandœuvre

lès Nancy

Technologies clés : 37

Grundfos France

Entreprise

03 87 91 84 00

Route de Faulquemont F-57740

Longeville les St Avoild

Technologies clés : 35

HYDREOS

Pôle de compétitivité

03 83 18 15 16

tombaine@hydreos.fr

71, rue de la Grande Haie - 54510

Tombaine - France

Technologies clés : 36

LORIA

laboratoire lorrain de recherche

en informatique et ses applications

Académique

03 83 59 20 00

josiane.reffort@loria.fr

LORIA - UMR 7503 - Campus

scientifique - BP 239 - 54506

Vandœuvre-les-Nancy Cedex

Technologies clés : 7

LRGP

Laboratoire Réactions et Génie

des Procédés

Académique

03 83 17 51 90

http://lrqp.univ-lorraine.fr/

presentation-du-laboratoire/contacts/

deposer-un-message/

1, rue Grandville BP 20451 - 54001

Nancy Cedex

Technologies clés : 24

Saint-Gobain Pont-à-Mousson

Entreprise

R&D

03 83 80 67 89

Pamline@saint-gobain.com

21, avenue Camille Cavallier - BP 129

- 54705 PONT-A-MOUSSON CEDEX

Technologies clés : 35

BPI Lorraine

BPI

03 83 67 46 74

http://contact.bpifrance.fr/#

9, rue Pierre Châlot CS 40375 54007

Nancy Cedex

Technologies clés :

IL

Incubateur

03 83 68 52 70/

natacha.hauser-costa@univ-lorraine.fr

24-30 rue Lionnois

BP 60120

54003 Nancy cedex

Technologies clés :

Inserm Grand Est (u954)

Académique

03 83 68 32 92

jean-louis.gueant@inserm.fr

Faculté de médecine

Bâtiment C 2ème étage

9 avenue de la Forêt de Haye -

B.P. 184 54505 VANDOEUVRE-

LES-NANCY CEDEX - France

Technologies clés : 26

7DIRECCTE Lorraine

DIRECCTE

03 54 48 20 01

lorrai-polec@direccte.gouv.fr

http://www.lorraine.direccte.gouv.fr/

accueil-28

Pôle C Cité administrative BP 61011

Technologies clés :

Martinique

BPI Martinique

BPI

05 96 59 44 73

http://contact.bpifrance.fr/#

Immeuble Cascades III Place François

Mitterrand - BP 804 97244 Fort-

de-France Cedex

Technologies clés :

DIECCTE Martinique

DIRECCTE

05 96 59 55 14

972-polec@dieccte.gouv.fr

http://www.martinique.dieccte.gouv.

fr/Martinique

Hôtel des Finances Route de Cluny

BP 7002

Technologies clés :

Mayotte

BPI Mayotte

BPI

02 69 64 35 00

http://contact.bpifrance.fr/#

c/o AFD - Résidence Sarah - Place

du marché BP 610 97600

Mamoudzou

Technologies clés :

DIECCTE Mayotte

DIECCTE

02 69 61 16 57

976.polec@dieccte.gouv.fr

http://www.mayotte.dieccte.gouv.fr/

Mayotte

3 ter rue Mahabou BP 174

Technologies clés :

Midi-Pyrénées

Aerospace Valley

Pôle de compétitivité

05 61 14 80 30

118 route de Narbonne, 31342

TOULOUSE CEDEX 4

Technologies clés : 1, 2, 4, 7, 9, 10,

12, 20, 21, 45

LAAS CNRS

Laboratoire d'analyse et d'architecture

des systèmes

Institut Carnot

05 61 33 62 00

7, avenue du Colonel Roche, BP

54200, 31031 Toulouse cedex 4

Technologies clés : 2, 7, 10, 11, 12,

18, 45, 46, 47

Airbus

Entreprise

05 61 93 33 33

http://www.airbusgroup.com/int/

en/investors-shareholders/Contact/

Contact-Form.html

1, Rond Point Maurice Bellonte, 31707

Blagnac Cedex

Technologies clés : 2, 5, 6, 7, 11, 20

IRT Saint-Exupéry

Ex AESE : Aéronautique, Espace,

Systèmes Embarqués

IRT

05 61 00 67 50

118 route de Narbonne, CS 44248 ,

31432 Toulouse cedex 4

Technologies clés : 1, 7, 10, 12,

20, 45

Sigfox

Entreprise

05 34 31 03 16

Bâtiment E-volution, 425, rue Jean

Rostand , 31670 Labège

Technologies clés : 2, 5, 6, 13

CIRIMAT

Centre Inter-universitaire de Recherche

et d'Ingénierie des Matériaux

Institut Carnot

05 61 55 62 80

Université Paul Sabatier, bâtiment

CIRIMAT, 118 Route de Narbonne,

31062 Toulouse

Technologies clés : 1, 9, 23

MetaToul

Académie

05 61 55 96 89

http://www.metatoul.fr/

LISBP/INSA de Toulouse

135 Avenue de Ranguieu

31077 Toulouse cedex 4

Technologies clés : 18

INRA Toulouse

Académie

05 61 28 50 28

http://www.toulouse.inra.fr/infos/

contact/2519

24 Chemin de Borde Rouge, 31326

<http://www6.toulouse.inra.fr/lca/>
Contact
4, allée Emile Monso - 31030
TOULOUSE

Technologies clés : 8

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés (INSA Toulouse)

Académique
05 61 55 94 01
nathalie.vettori@insa-toulouse.fr
135 avenue de Rangueil - 31077
Toulouse cedex 4

Technologies clés : 24

Lallemand Plant Care

Entreprise
05 34 27 67 80
<http://www.lallemandplantcare.com/nous-contacter/>
4, Route de Beauport 31180
CASTELMAUROU

Technologies clés : 27

LGC de l'Ensiacet

Laboratoire de Génie Chimique
Académique
05 34 32 36 00
lgc-contact@ensiacet.fr
CAMPUS INP - ENSIACET - 4 allée
Emile Monso - CS 84234 - 31 432
Toulouse cedex 4

Technologies clés : 24

LibraGen

Entreprise
05 62 19 32 90
contact@libragen.com
Canal Biotech I, 3 rue des Satellites,
31400 Toulouse

Technologies clés : 8

LISBP

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes
Biologiques et des Procédés
Académique
05 61 55 94 01
nathalie.vettori@insa-toulouse.fr
UMR INSA/CNRS 5504 - UMR INSA/
INRA 792
135 Avenue de Rangueil
31077 TOULOUSE CEDEX 4

Technologies clés : 24

MiPih

groupement d'intérêt public
de centres hospitaliers
GIP
05 34 61 50 00
<http://www.mipih.fr/contact.html>
12, rue Michel Labrousse 31036
Toulouse Cedex 1

Technologies clés : 33

MyFox

Entreprise
05 61 00 07 11
REGENT PARK II BATIMENT I - 2460
L'OCCITANE 31670 LABEGE

Technologies clés : 5

Naio Technologies

Entreprise
09 72 45 40 85
contact@naio-technologies.com
Villa EL PASO - 12 avenue de l'Europe
31520 Ramonville Saint Agne

Technologies clés : 10

Perax

Entreprise
05 62 75 95 75
ventes@perax.fr
18 chemin de la Violette - 31240
L'UNION

Technologies clés : 35

QoS Design

Entreprise
05 61 58 33 57
info@qosdesign.com
6, Avenue Marcel Doret 31500,
Toulouse

Technologies clés : 4

Robotics Place

Cluster
contact@robotics-place.com
815 la Pyrénéenne - Prologue, 31670
LABEGE

Technologies clés : 12

Solvonic

Entreprise
05 62 25 73 71
contact@solvonic.com
Site SNPE Chemin de la Loge CS
27813 - 31078 Toulouse cedex 4

Technologies clés : 23

Sunbirds

Start-up
06 77 23 93 11
laurent.riviere@sunbirds-uas.com
10, avenue de l'Europe 31 520
Ramonville-St-Agne

Technologies clés : 12

Agri Sud-Ouest Innovation

Pôle de compétitivité
0 5 61 32 13 60
<http://www.agrisudouest.com/fr/contact.html>
Agri Sud-Ouest Innovation - Parc
Technologique du Canal - Bât. Napa
Center A - 3 rue Ariane - BP 72137 -
31521 Ramonville Saint Agne Cedex

Technologies clés : 27

BPI Midi-Pyrénées

BPI
05 61 11 52 00
<http://contact.bpifrance.fr/#>
Boite postale 63379 - 24, avenue
Georges Pompidou - 31133 Balma
Cedex

Technologies clés :

MIPY

Incubateur
05 34 31 67 47
charbonnier@incubateurmipy.com
49 Grande Rue Saint Michel
Résidence Axe Sud
31400 Toulouse

Technologies clés :

Toulouse Tech Transfert

SATT
05 62 25 50 60
<http://www.toulouse-tech-transfert.com/contact/>
118 route de Narbonne
CS 24246 - 31432 Toulouse cedex 4

Technologies clés :

DIRECCTE Midi-Pyrénées

DIRECCTE
05 62 89 81 00
midipy-polec@direccte.gouv.fr
<http://www.midi-pyrenees.direccte.gouv.fr/accueil-16>
Pôle C 5 esplanade Compans Caffarelli
BP 98016

Technologies clés :

Nord-Pas-de-Calais

CITC EuraRFID

Centre d'Innovation des Technologies
sans Contact
Cluster
03 20 19 18 52
165 Avenue de Bretagne, 59000 Lille

Technologies clés : 5, 7, 10, 12

IEMN Lille

Institut d'électronique de
microélectronique et de
nanotechnologie
Académique
03 20 19 79 79
<http://exploit.iemn.univ-lille1.fr/contact>
UMR CNRS 8520 - Laboratoire Central
- Cité Scientifique - Avenue Poincaré
- CS 60069 - 59652 VILLENEUVE
D'ASCQ CEDEX

Technologies clés : 2, 5, 18, 46

I-Trans

Pôle de compétitivité
03 27 19 00 10
stephane.torrez@i-trans.org
2 Place de la Bourse, B.P. 500, 59001
LILLE

Technologies clés : 10, 12, 20, 45

CRISTAL

Centre de Recherche en Informatique,
Signal et Automatique de Lille
Académique
03 28 77 85 41
Bâtiment M3, Université Lille 1, 59655
Villeneuve d'Ascq Cedex

Technologies clés : 10, 12, 19

Railenium

IRT
03 66 72 26 93
contact@railenium.eu
<http://www.railenium.eu/contact/>
Espace Technopôle - Le Mont Houy
- Route départementale 958, 59300
FAMARS

Technologies clés : 1, 7, 45

Tereos

Entreprise
03 28 38 79 30
infotereos@tereos.com
Parvis de Rotterdam, Tour Lilleurope
F-59777 LILLE

Technologies clés : 8, 24, 26

Lesaffre

Entreprise
03 20 81 61 00
<http://www.lesaffre.com/fr/contact/>
137 rue Gabriel Péri - 59700 Marcq-
en-Baroeul

Technologies clés : 24, 26

Matikem

Pôle de compétitivité
03 20 34 54 80
<http://www.matikem.com/contactez-nous>
Parc scientifique de la Haute Borne -
9 rue Héloïse 59650 Villeneuve d'Ascq

Technologies clés : 1, 39

Picom

Pôle de compétitivité des industries
du commerce
Pôle de compétitivité
03 20 99 23 90
picom@citeonline.org
Entreprises et Cités, 40 rue Eugène
Jaquet 59708 Marcq-En-Baroeul

Technologies clés : 10, 12

TEAM2

Pôle de compétitivité
03 21 20 91 62
info@team2.fr
Base du 11/19 Rue de Bourgogne
62750 Loos-en-Gohelle

Technologies clés : 16, 37

Alkern

Entreprise
03 21 79 34 30
info@alkern.fr
ZI PARC DE LA MOTTE AU BOIS, RUE
ANDRE BIGOTTE 62440 HARNES

Technologies clés : 39

Alstom Transport

Entreprise
R&D
03 27 14 18 00
<http://www.alstom.com/fr/general-contact-us/>
Rue Jacquart, 59494 Petite-Forêt

Technologies clés : 7, 45

AxBx

Entreprise
03 66 72 27 00
contact@axbx.com
AxBx, 53, rue Albert Samain 59650
Villeneuve d'Ascq

Technologies clés : 19

Baudelet Environnement

Entreprise
03 28 43 92 20
<http://www.baudelet-environnement.fr/contact/>
Lieu-dit « Les Prairies » 59173
Blaringhem

Technologies clés : 16

Bombardier

Entreprise
03 27 23 53 00
anne.froger@fr.transport.bombardier.com
1 Place des Ateliers BP1
59154 Crespin

Technologies clés : 45

CRIL

Centre de Recherche en Informatique
de Lens
Académique
03 21 79 17 23
gestion@cril.univ-artois.fr
UFR des Sciences Jean Perrin

Rue Jean Souvraz SP 18
62307 Lens Cedex

Technologies clés : 5

Département Génie civil et environnemental des Mines de Douai

Académique
03 27 71 22 22
<http://gce.mines-douai.fr/contact>
École des Mines de Douai
Centre de Recherche
764 boulevard Lahure
59508 DOUAI Cedex

Technologies clés : 37

École des Mines de Douais

Académique
03 27 71 22 22
esm@mines-douai.fr
746 Boulevard Lahure 59500 DOUAI

Technologies clés : 1

Genoscreen

Entreprise
03 20 87 71 53
<http://www.genoscreen.fr/fr/contact>
Campus de l'Institut Pasteur de Lille-
Bâtiment Guérin - 4ème étage - rue
du Professeur Calmette 59000 Lille

Technologies clés : 26

Giroptic

Start-up
contact@giroptic.com
<http://support.360.tv/customer/widget/emails/new>
165 Avenue de Bretagne, 59000 Lille

Technologies clés : 5

IEMN

Institut d'électronique, de
microélectronique et de
nanotechnologie
Académique
Recherche
<http://exploit.iemn.univ-lille1.fr/contact>
Institut d'Electronique, de
Microélectronique et de
Nanotechnologie UMR CNRS 8520
Laboratoire Central - Cité Scientifique
- Avenue Poincaré - CS 60069 -
59652 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

Technologies clés : 23

IFMAS

Institut Français des Matériaux Agro-
Sourcés
ITE
03 62 26 00 14
contact@ifmas.eu
60 Avenue Halley 59650 VILLENEUVE
D'ASCQ

Technologies clés : 8

INRA - Laboratoire d'analyse des sols

Laboratoire d'analyse des sols
Académique
03 21 21 86 00
<http://www6.lille.inra.fr/las/Contact>
273 rue de Cambrai
62000 ARRAS

Technologies clés : 37

Institut Français du textile et de l'Habillement

Fédération professionnelle
france@ifth.org
Zone de l'Union
41, rue des Métissages
59 200 TOURCOING

Technologies clés : 1

IRCICA

Académique
03 62 53 15 00
http://www.ircica.univ-lille1.fr/spip.php?page=auteur&id_auteur=1&lang=fr
50 Avenue du Halley 59650
Villeneuve-d'Ascq

Technologies clés : 5

L2EP

Laboratoire d'électrotechnique
et d'électronique de puissance de Lille
Académique
03 20 43 42 35
Secretariat-L2ep@univ-lille1.fr
Université des Sciences et Technologies
de Lille - Bâtiment P2 - 59655
Villeneuve d'Ascq

Technologies clés : 22

Laboratoire des Sciences chimiques des Mines de Douai

Académie
03 27 71 22 22
http://ce.mines-douai.fr/contact
764 Boulevard Lahure École des Mines de Douai
941 rue Charles Bourseul
CS10838
59508 DOUAI Cedex
59500 Douai
Technologies clés : 36

Lesaffre Human Care

Entreprise
03 20 81 61 00
http://www.lesaffrehumancare.fr/autres/contact.html
Benoît LAPLAIZE, 137 rue Gabriel Péri
59700 MARCQ-EN-BAROEUL
Technologies clés : 28

Natural Security Alliance

Association
03 61 76 14 61
Contact@naturalsecurityalliance.org
165 avenue de Bretagne 59000 Lille
Technologies clés : 34

Nenuphar Wind

Entreprise
09 83 89 27 78
http://www.nenuphar-wind.com/contact.php
Campus de l'Institut Pasteur - 1 Rue du Professeur Calmette 59000 LILLE
Technologies clés : 43

Neo Eco

Entreprise
03 20 10 31 18
Contact@neo-eco.fr
70 Rue de la Canteraine 59320 Haubourdin
Technologies clés : 16

Nutrition Santé Longévité

Pôle de compétitivité
03 28 55 50 14
http://pole-nsi.org/contact/
Pôle Nutrition Santé Longévité - Parc Eurasanté Ouest - 310 avenue Eugène Avinée 59120 LOOS (Lille métropole - FRANCE)
Technologies clés : 28

Pictanovo

Cluster
03 20 28 26 40
sfouille@pictanovo.com
21 rue Edgar Quinet - CS 40152 - 59333 Tourcoing Cedex
Technologies clés : 47

Plateforme Pégase

Académie
patricia.paul@pasteur-lille.fr
http://www.pegase-biosciences.com/contactez-nous/
Unité PEGASE
2ème étage - Bâtiment Guerin
Institut Pasteur de Lille
59000 LILLE
Technologies clés : 26

Ramery Environnement

Entreprise
03 20 77 86 00
http://www.ramery.fr/contact.html
740 Rue du bac 59193 ERQUINGHEM-LYS
Technologies clés : 37

Recytech

Entreprise
03 21 79 13 50
SecretariatRECYTECH@RECYTECH.FR
route de Noyelles - 62740 Fouquières-lez-Lens
Technologies clés : 16

Roquette

Entreprise
03 21 63 36 00
Roquette Freres 62080 Lestrem
Technologies clés : 8

Rubika

Académie
03 27 51 35 10
http://rubika-edu.com/contact
2 rue Pecllet - 59300 Valenciennes
Technologies clés : 14

Smarteo Water

Start-up
01 79 73 38 00
smarteo@smarteo-water.com
4 avenue de l'Europe C. I. T. 59 223 RONCQ
Technologies clés : 35

Stratiforme

Entreprise
03 20 84 90 10
commercial@stratiforme.com
570 rue du Pavé F - 59235 Bersée
Technologies clés : 1

UCCS

Unité de Catalyse et de Chimie du Solide de Lille
Académie
03 20 43 49 49
Université Lille 1, Sciences et Technologies - Bâtiment C3 - 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
Technologies clés : 24

Up-Tex

Pôle de compétitivité
03 62 72 61 00
contact@up-tex.fr
41 rue des Métisages - CS 70314 - 59336 TOURCOING CEDEX
Technologies clés : 1

VF Bioscience

Entreprise
http://www.vfbioscience.com/en/contact
Parc Eurasanté 310 rue Jules Vallès, 59120 Loos-lez-Lille
Technologies clés : 28

Yanara

Entreprise
03 61 25 07 73
info@yanara-technologies.com
9 Avenue Marc Lefrançois, ZAC Valenciennes-Rouvignies 59121 PROUVY
Technologies clés : 1

Aquimer

Pôle de compétitivité
03 21 10 78 98
http://www.poleaquimer.com/fr/contact.html
16 rue du Commandant Charcot 62200 Boulogne-sur-Mer
Technologies clés : 28

BPI Nord-Pas-de-Calais

BPI
03 20 81 94 94
http://contact.bpifrance.fr/#32, boulevard Carnot 59000 Lille
Technologies clés :

Eurasanté

Incubateur
03 28 55 90 60
skalla@eurasante.com
Parc Eurasanté
310 avenue Eugène Avinée
59120 Looz lez Lille
Technologies clés :

SATT Nord

SATT
03 28 36 04 68
lille@sattnord.fr
http://sattnord.fr/rencontrer/nous-contacter/
2, Rue du Priez - 59800 Lille
Technologies clés :

DIRECCTE Nord-Pas-de-Calais

DIRECCTE
03 20 13 62 00
nordpdc-polec@direccte.gouv.fr
http://www.nord-pas-de-calais.direccte.gouv.fr/accueil-240
Pôle C 107 boulevard de la liberté CS 20008
Technologies clés :

Pays de la Loire

IRT Jules Verne
IRT
02 28 44 34 07
contact@irt-jules-verne.fr
Chemin du Chaffault, 44340 Bouguenais
Technologies clés : 1, 9, 12, 43, 45

IDforCAR

Pôle de compétitivité
02 28 44 36 50
Technocampus Composites, Chemin du Chaffault - ZI Le Chaffault 44340 Bouguenais
Technologies clés : 10, 12, 20, 45

Atos - Bull

Entreprise
02 41 73 70 00
http://www.bull.com/fr/contactez-nous-0
357 av. PATTON 49000 Angers
Technologies clés : 3, 6, 21

EMC2

Pôle de compétitivité
02 28 44 36 00
Chemin du Chaffault • 44340 BOUGUENAIS
Technologies clés : 1, 9, 10, 12

Atlanpole Biotherapies

Pôle de compétitivité
02 40 25 13 13
http://www.atlanpolebiotherapies.com/Atlanpole-Biotherapies/Contact-Atlanpole-Biotherapies
ATLANPOLE Siège, Site de la Chanterrie - 95, Route de Gachet - BP 90702 - 44307 Nantes Cedex 3
Technologies clés : 15, 29

École Centrale de Nantes

Académie
02 40 37 16 21
1 Rue de la Noë - BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3
Technologies clés : 1, 9

EFS - Atlantic Bio GMP

Établissement Français du Sang
Académie
02 40 44 28 80
abg.nantes@efs.sante.fr
EFS-Atlantic Bio GMP
Centre Bio Ouest Laënnec
2 rue Aronnax 44800 Saint-Herblain
Technologies clés : 29, 36

IRCCyN

Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes
Académie
http://www.irccyn.ec-nantes.fr/fr/irccyn/plan-d-acces
1, rue de la Noë
BP 92101
44321 NANTES Cedex 3
Technologies clés : 9, 10, 12

Qowisio

Entreprise
02 41 45 69 04
Bâtiment Linéo, 4 rue Fulton, 49912 Angers cedex 9
Technologies clés : 2, 5

Thales Communications & Security

Entreprise
02 41 64 57 00
https://www.thalesgroup.com/fr/content/contactez-nous
110 Avenue du Maréchal Leclerc 49300 Cholet
Technologies clés : 3, 5, 7, 11, 13, 20, 45

Agrauxine (Lesaffre)

Entreprise
02 41 77 80 77
contact@agrauxine.fr
2 Rue Henri Becquerel 49070 Beaucaouz
Technologies clés : 27

Association Construire en Chanvre

Association
construire-en-chanvre@bbox.fr
http://www.construire-en-chanvre.fr/?q=nous-contacter
20 rue Paul Ligneul 72 000 Le Mans
Technologies clés : 39

Baudet

Entreprise
02 51 66 27 85
contact@baudet-sa.com
Rue Saint-Fiacre 85640 Mouchamps
Technologies clés : 1

Bouyer Leroux

Entreprise
02 41 63 76 16
info@bouyer-leroux.fr
L'Établère 49 280 La Séguinière
Technologies clés : 39

CLARTE

Association
02 43 59 46 20
contact@clarte.asso.fr
38 Rue des Docteurs Calmette et Guérin 53000 Laval
Technologies clés : 14

Clean Cells

Entreprise
02 51 09 27 57
contact@clean-cells.com
Rue Marie Curie, Parc d'Activités Vendée Sud Loire 1, 85600 BOUFFÈRE
Technologies clés : 26

E4V

Entreprise
01 45 50 35 22
contact@e4v.eu
http://www.e4v.eu/contact
9, avenue Georges Auric, 72000 Le Mans
Technologies clés : 23

Eolane

Entreprise
02 41 19 90 54
http://www.eolane.com/contact/information-request/
La Fresnay 49123 - Le Fresne sur loire
Technologies clés : 13

GdR Hydrogène, Systèmes et Piles à Combustible

Académie
Groupement de Recherche
02 40 37 39 36
Olivier.Joubert@cnsr-immn.fr
IMN, UMR 6502, CNRS-Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, BP 32229, 44322 Nantes, CEDEX 3
Technologies clés : 25

HYDROCEAN

Start-Up
02 40 20 60 84
contact@hydrocean.fr
8 Boulevard Albert Einstein - CS 32327 - 44323 Nantes Cedex 3
Technologies clés : 4

IMN

Institut des Matériaux de Nantes
Académie
Recherche
contact@cnsr-immn.fr
2 rue de la Houssinière, BP32229, 44322 Nantes cdx3
Technologies clés : 23

In-Cell-Art

Entreprise
02 40 71 67 17
info@incellart.com
Immeuble Bio-Ouest Halle 13, 21 rue de la Noue Bras de Fer, 44200 Nantes
Technologies clés : 26

Institut d'informatique appliquée

Académie
02 43 91 47 47
infos@ia-laval.fr
5 Boulevard de l'Industrie, 53940 Saint-Berthevin
Technologies clés : 14

Institut du Thorax

Académie
02 28 08 01 10
U1087@univ-nantes.fr
Inserm UMR 1087 / CNRS UMR 6291 - IRS - Université de Nantes - 8 quai Moncoussu - BP 70721 - 44007 NANTES Cedex 1
Technologies clés : 29

Miti

Entreprise
02 40 35 80 46
miti2@wanadoo.fr
58 BOULEVARD GUSTAVE ROCH 44200 NANTES
Technologies clés : 28

Neoditech

Entreprise
02 40 46 15 71
info@neoditech.com
Z.A. DES ROITELIERES (ROUTE
DE LA CHAPELLE-HEULIN
AXE NANTES CHOLET) 44330
LE PALLET
Technologies clés : 10

Oniris

Académie
02 40 68 77 77
http://www.oniris-nantes.fr/liens-utiles/
contact?no_cache=1
ONIRIS Site de la Chantrerie
CS 40706 44307 Nantes cedex 3
Technologies clés : 28

Rollix

Entreprise
info@rollix.com
1 Rue Saint Eloi
85530 - LA BRUFFIERE
Technologies clés : 43

Salon Laval-Virtual

Association
02 43 49 75 57
contact@laval-virtual.org
6 rue Léonard de Vinci CS 20119
53001 LAVAL CEDEX
Technologies clés : 14

Séché Énergie

Entreprise
02 43 59 60 00
Les Hêtres 53811 Changé
Technologies clés : 44

Séché Environnement

Entreprise
02 43 59 60 00
Les Hêtres 53811 Changé
Technologies clés : 37

SPBI Bénéteau

Entreprise
02 51 31 78 10
Parc d'Activités de l'Éraudière, BP 45,
85170 DOMPIERRE SUR YON
Technologies clés : 1

STX

Entreprise
02 51 10 91 00
france@stxeurope.com
Avenue Bourdelle - CS90180 - 44613
Saint-Nazaire Cedex
Technologies clés : 43

Systovi

Entreprise
02 40 92 44 20
contact@systovi.com
5 rue du Chêne Lassé - CP 1008 - 44
806 Saint-Herblain Cedex
Technologies clés : 42

UTCG

unité de thérapie cellulaire et génique
(UTCG)
Académie
02 40 08 31 18
gwenaëlle.boue@univ-nantes.fr
CHU de Nantes
9 quai moncoussu
44093 NANTES CEDEX
Technologies clés : 29

Végépolys

Pôle de compétitivité
02 41 72 17 37
http://www.vegepolys.eu/vegepolys/
contact/
26, rue Jean Dixmeras - 49066 Angers
Cedex 1
Technologies clés : 27

Atlanpôle

Incubateur
02 40 25 13 99
six-brouillet@atlanpole.fr
Château de la Chantrerie
BP 90702
44307 Nantes cedex 3
Technologies clés : 3

BPI Pays de la Loire

BPI
02 51 72 94 00
http://contact.bpifrance.fr/#
53, chaussée de la Madeleine CS

42304 44023 Nantes Cedex 1

Technologies clés :**Atlantic**

Entreprise
02 51 44 34 34
jfoucault@groupe-atlantic.com
Rue Monge, 85000 La Roche-sur-Yon
Technologies clés : 40

DIRECCTE Pays de la Loire

DIRECCTE
02 54 46 79 00
pasdyl-polec@direccte.gouv.fr
http://www.pays-de-la-loire.direccte.
gouv.fr/Pays-de-la-Loire
Pôle C Immeuble Skyline 22 Mail Pablo
Picasso BP 24209
Technologies clés :

Picardie**IAR**

Industrie & Agro-Ressources
Pôle de compétitivité
03 23 23 25 25
http://www.iar-pole.com/contact
50 - 52 Boulevard Brossolette
BP 05 02 930 LAON Cedex
Technologies clés : 8, 24, 26, 39

INERIS

Institut National de l'Environnement
Industriel et des Risques
Établissement public
03 44 55 66 77
http://www.ineris.fr/ineris_formulaire/
general
Parc Technologique ALATA - B.P. n° 2-
60550 Verneuil-en-Halatte
Technologies clés : 25, 36, 37

UTC

Université de Technologie
Compiègne
Académie
03 44 23 44 23
valerie.moreau@utc.fr
rue du docteur Schweitzer, CS 60319,
60203 COMPIEGNE CEDEX
Technologies clés : 7, 10

BioMécanique et BioIngénierie (BMBI) - UTC

Académie
03 44 23 45 06
mircea-dan.istrate@utc.fr
BMBI UMR CNRS 7338 BioMécanique
et BioIngénierie
Université de Technologie
de Compiègne (UTC) - Compiègne
France
Centre de Recherches de Royallieu
Rue Personne de Roberval - 60200
Compiègne
Technologies clés : 12, 31

Laboratoire HEUDIASYSC - UTC

Heuristique et Diagnostic des Systèmes
Complexes
Académie
03 44 23 46 45
ali.charara@hds.utc.fr
Laboratoire Heudiasyc
UMR CNRS 7253
Département Génie Informatique
UTC - B.P. 20529
60205 Compiègne Cedex
Technologies clés : 12, 45

CETIM

Institut Carnot
03 44 67 36 82
http://www.cetim.fr/fr/Le-Cetim/
Contactez-nous
52 Avenue Félix Louat, 60300 Senlis
Technologies clés : 1, 44

CODEM - le Batlab

Entreprise
03 22 34 27 05
contact@codempicardie.com
Picardie Technopole - 41 Ave Paul
Claudel 80480 Dury
Technologies clés : 39

CVG

Centre de Valorisation des glucides
CRIT
03 22 33 75 00
cvg@cvgn.com
http://www.cvgpn.com/contact.html

33 avenue Paul Claudel 80480 Dury

Technologies clés : 8**Laboratoire ROBERVAL - UTC**

Mécanique Acoustique et Matériaux
Académie
03 44 23 45 50
http://roberval.utc.fr/spip.
php?page=auteur&id_
auteur=1&lang=fr
Université de Technologie de
Compiègne
Centre de Recherches de Royallieu
CS 60319
60203 Compiègne Cedex
Technologies clés : 45

LGZA

Laboratoire de Glycochimie,
des Antimicrobiens
et des Agroressources
Académie
03 22 82 75 60
carole.darguesse@u-picardie.fr
https://www.u-picardie.fr/labo/LG/
Contact.html
Laboratoire de Glycochimie, des
Antimicrobiens et des Agroressources
FRE 3517 CNRS
33 rue Saint-Leu
80000 Amiens
Technologies clés : 23

LRCS (Amiens)

Laboratoire de Réactivité et Chimie
des Solides
Académie
03 22 82 75 72
carine.lenfant@u-picardie.fr
UMR CNRS 7314, Université
de Picardie Jules Verne - 33 Rue Saint
Leu 80039 Amiens Cedex
Technologies clés : 23

Novhisol

Entreprise
03 60 12 40 90
novhisol@novhisol.com
240 rue Eolis, 80880 St QUENTIN-
LA-MOTTE
Technologies clés : 39

Novitact

Start-up
03 44 37 05 96
contact@novitact.com
http://www.novitact.com/fr/contact
Bureau principal
Parc Tertiaire et Scientifique
249 rue Irène Joliot Curie
Lacroix Saint Ouen - 60610
Technologies clés : 5

PIVERT

Picardie Innovations Végétales,
Enseignements et Recherches
Technologiques
ITE
03 44 90 79 42
contact@sas-pivert.com
Parc Technologique des Rives de l'Oise
, Rue Les Rives de l'Oise CS 50149 -
VENETTE - F-60201 COMPIEGNE
Technologies clés : 8

Thermorenov

Association
http://www.renovationdemaison.net/
contacter-entreprise-renovation-maison/
contacter-renovateur-maison.html
64 avenue Jean Jaurès 60400 NOYON
Technologies clés : 38

BPI Picardie

BPI
03 22 53 11 80
http://contact.bpifrance.fr/#
18, rue Cormont CS 70302 80003
Amiens Cedex 1
Technologies clés :

DIRECCTE Picardie

DIRECCTE
03 22 22 41 36
picard-polec@direccte.gouv.fr
http://www.picardie.direccte.gouv.fr/
accueil-33
Pôle C 40 rue de la Vallée
Technologies clés :

Easyli

Entreprise
05 86 16 10 00

contact@easylibatteries.com
8 rue des frères Montgolfier - 86100
Châtelleraut
Technologies clés : 23

Poitou-Charentes**Eco-habitat**

Cluster
05 45 24 88 35
contact@cluster-ecohabitat.fr
http://www.cluster-ecohabitat.fr/site/
qui-sommes-nous/nous-contacter/
Cluster Eco-Habitat Poitou-Charentes
3, rue Raoul Follereau 86000 POITIERS
Technologies clés : 42

ENJMIN

École nationale du jeu et des médias
interactifs numériques du Cnam
Académie
05 45 68 06 78
contact@cnam-enjmin.fr
138 rue de Bordeaux 16000
ANGOULEME
Technologies clés : 47

iCanopée

Entreprise
05 49 49 64 73
contact@icanopee.fr
15, avenue René Cassin 86961
Futuroscope - Chasseneuil
Technologies clés : 33

Leroy Somer

Entreprise
05 45 64 45 64
http://www.emersonindustrial.com/fr-
FR/Leroy-Somer-Group/Contact/Pages/
contact-us.aspx
bd Marcellin Leroy, 16000
ANGOULEME
Technologies clés : 43

Magelis

Cluster
05 45 38 00 00
3 rue de la charente 16000
Angoulême
Technologies clés : 47

S'Tile

Entreprise
05 79 79 60 10
contact@silicontile.com
Pôle des Eco-Industries
de Poitou-Charentes - 3 rue Raoul
Follereau - 86000 Poitiers
Technologies clés : 42

Tipee

Technological & Innovative Platform
for Environmental Efficiency
05 16 49 67 84
contact@tipee-project.com
Université de La Rochelle - Pôle
Sciences et Technologie - LaSIE -
Avenue Michel Crépeau - 17042
La Rochelle Cedex 1
Technologies clés : 38

BPI Poitou-Charentes

BPI
05 49 49 08 40
http://contact.bpifrance.fr/#
CS 70362 70, rue Jean-Jaurès 86009
Poitiers Cédex
Technologies clés :

DIRECCTE Poitou-Charentes

DIRECCTE
05 49 50 20 77
poitou-polec@direccte.gouv.fr
http://www.poitou-charentes.direccte.
gouv.fr/accueil-21
Pôle C 47 rue de la Cathédrale
Technologies clés :

Provence-Alpes-Côte-d'Azur**SCS**

Solutions Communicantes
et Sécurisées
Pôle de compétitivité
04 89 86 69 30
contact@pole-scs.org
Business Pôle, 1047 route des Dolines,
Allée Pierre Ziller, Bâtiment B, entrée
B, 1^{er} étage 06560 Valbonne - Sophia
Antipolis
Technologies clés : 2, 3, 4, 6, 13,
20, 22, 34

Capenergies

Pôle de compétitivité
04 84 30 05 70
contact@capenergies.fr
Bâtiment Henri Poincaré Domaine
Petit Arbois, Avenue Louis Philibert
- CS 30658, 13547 Aix en Provence
Cedex 4
Technologies clés : 25, 40, 42, 43

Eurobiomed

Pôle de compétitivité
04 91 13 74 65
http://www.eurobiomed.org/contact/
8, rue Sainte Barbe 13001 Marseille
Technologies clés : 18, 26, 29

Inserm (u476)

Académique
04 91 29 40 90
secretariat.unite476@medecine.
univ-mrs.fr
27, Bd Jean Moulin
Faculté de Médecine La Timone
13385 MARSEILLE Cedex 05 13009
Technologies clés : 18

Saint Gobain - Cree

Centre de Recherches et d'Études
Européen
Entreprise
R&D
04 32 50 09 00
http://www.saint-gobain-recherche.fr/
fr/contact#
550 Rue Alphonse Jauffret, 84300
Cavaillon
Technologies clés : 23, 42

CEA Cadarache

Académique
04 42 25 70 00
CEA Cadarache, 13115 Saint-Paul-
lès-Durance
Technologies clés : 4, 44

IHU POLMIT

Institut Hospitalo-Universitaire
en maladies infectieuses - Marseille
IHU
04 91 38 55 17
Unité de Recherche sur les Maladies
Infectieuses et Tropicales Émergentes
(URMITE) - UMR 6236 - Faculté
de médecine - 27 Bd Jean Moulin -
13385 MARSEILLE Cedex 05
Technologies clés : 18, 26

NawaTechnologies

Entreprise
04 42 61 68 03
Contact@nawatechnologies.com
9, rue des Genêts - Lot des Lampis
13510 Eguilles
Technologies clés : 1, 23

Pegase

Pôle de compétitivité
04 42 12 68 68
http://www.pole-pegase.com/
contact-9.html
Pôle Pégase / Domaine du petit Arbois
- Avenue Louis Philibert 13545 Aix
en Provence cedex 4
Technologies clés : 20, 45

Sunpartner

Entreprise
04 42 39 86 44
http://sunpartnertechnologies.fr/
contact-us/
Chateau de Galice, 1940 route
de Loqui 13090 Aix-en-Provence
Technologies clés : 40, 42

BioMeT INRA

Plateau de Biologie Métabolomique
de Marseille Timone
Académique
jean-charles.martin@univmed.fr
27 bd Jean Moulin, Fac de pharmacie,
13685 Marseille
Technologies clés : 18

Théorie et simulation numérique

Académique
04 91 17 28 00
direction@cinam.univ-mrs.fr
CINaM
Campus de Luminy
Case 913
13288 Marseille Cedex 9
Technologies clés : 4

Powersys

Entreprise
04 42 61 02 29
http://www.powersys-solutions.com/
contact/
Les Jardins de l'Entreprise BP 35 |
13610 Le Puy-Sainte-Réparate
Technologies clés : 4

ADF

Entreprise
04 42 77 48 50
http://www.groupeadf.com/francais/
contact.html
La Bastide Blanche – Bât.G - 13746
Vitrolles Cedex
Technologies clés : 44

Aloe Energy

Entreprise
04 42 01 65 80
contact@aloe-energy.com
ZI Athélia I – bâtiment C – 420 rue
des Mattes 13 705 La Ciotat cedex
Technologies clés : 42

Areva Stockage d'Énergie

Entreprise
04 42 90 81 50
Domaine du Petit Arbois Bâtiment
Jules Verne Avenue Louis Philibert
CS 10656 13547 Aix-en-Provence
Cedex 4
Technologies clés : 25

Bardot

Entreprise
04 42 73 31 00
http://www.bardotgroup.com/fr/
contact
ZI Athelia 4 - 297 avenue du Mistral
13600 La Ciotat
Technologies clés : 15

Boralex

Entreprise
04 91 01 64 40
info@boralex.com,
25, rue de la République
13 002 Marseille
Technologies clés : 43

Capsum

Entreprise
04 91 21 02 90
http://www.capsum.net/contact/
Héliopolis Bâtiment C – 3 allée
des Maraichers – 13013 Marseille
Technologies clés : 18

CEA Ibea

Institut de biologie environnementale
et biotechnologie
Académique
04 42 25 70 88
thierry.heulin@cea.fr
CEA Cadarache, 13115 Saint-Paul-
lès-Durance
Technologies clés : 8

CMR Group - France

Entreprise
04 91 11 37 00
cmr-fr@cmr-group.com
Technopole de Château Gombert
7 rue John Maynard Keynes BP 85
13381 Marseille Cedex 13 FRANCE
Technologies clés : 44

C'Nano PACA

centre de compétences en
nanosciences et nanotechnologies
Réseau
06 20 45 92 52
contact@cnano-paca.org
Campus de Luminy – Case 913 -
13288 Marseille cedex 9
Technologies clés : 46

CORAC

Commission Régionale
Des Associations de Chantier
Association
06 50 35 03 72
corac.paca@gmail.com
7 avenue Pierre de Coubertin 06150
CANNES-LA-BOCCA
Technologies clés : 45

Cybernetix

Entreprise
04 91 21 77 00

http://www.cybernetix.fr/contactez-
nous/31
Technopôle de Château-Gombert,
306 rue Albert Einstein, B.P 94, 13382
Marseille Cedex 13
Technologies clés : 12

DualSun

Entreprise
04 13 41 53 70
contact@dualsun.fr
Pôle de l'Étoile – Technopôle
de Château-Gombert, 38, rue Frédéric
Joliot-Curie, 13451 Marseille Cedex 13
Technologies clés : 42

Ecologicsense

Entreprise
04 42 29 46 90
https://sites.google.com/site/
ecologicsense/contactez-nous
ZI Rousset - 605 Avenue Olivier Perroy
- 13790 Rousset
Technologies clés : 36

EMC3

Entreprise
04 94 14 49 20
contact@emc3-fr.com
Centre d'Affaires Grand Var –
Bâtiment C - 83130 La Garde
Technologies clés : 15

Enovacom

Entreprise
04 86 67 00 00
http://www.enovacom.fr/contact.html
521, avenue du Prado - BP 80 186 –
13268 Marseille Cedex 8
Technologies clés : 33

Eole-RES

Entreprise
01 53 93 66 20
info@eoleres.com
330 rue du Mourelet - ZI de Courtine -
F-84000 AVIGNON
Technologies clés : 43

Eurecom

Académique
04 93 00 81 00
Campus SophiaTech, 450 Route
des Chappes, CS 50193 - 06904 Biot
Sophia Antipolis cedex
Technologies clés : 6

ICR

Institut de Chimie Radicalaire
Académique
04 91 39 65 00
http://icr-amu.cnrs.fr/spip.
php?page=auteur&id_
auteur=1&lang=fr
52 Avenue Escadrille Normandie
Niemen, 13013 Marseille
Technologies clés : 23

Ideol

Entreprise
04 86 20 80 50
http://ideol-offshore.com/fr/formulaire/
nous-contacter
Espace Mistral – Bât B, 375 avenue
du Mistral 13600 La Ciotat
Technologies clés : 43

Immunopôle de Marseille

Académique
com@marseille-immunopole.org
Parc de Luminy
13288 Marseille
Technologies clés : 15

Innate Pharma

Entreprise
04 30 30 30 30
info@innate-pharma.fr
117, Avenue de Luminy - BP 30191 -
13 009 Marseille
Technologies clés : 15

Insidsecure

Entreprise
04 42 90 59 05
http://www.insidsecure.com/
Contact-us
Arteparc Bachasson – Bâtiment A
- Rue de la carrière de Bachasson -
13590 MEYREUIL
Technologies clés : 34

Ipsogen

Entreprise
0491 29 30 90
info@qiagenmarseille.com
Luminy Biotech Entreprises, Case
923, 163 avenue de Luminy, 13288
Marseille - Cedex 9
Technologies clés : 18

MADIREL

Académique
Recherche
04 13 55 18 19
renaud.denoyel@univ-amu.fr
Campus Scientifique de St Jérôme
F-13397 Marseille Cedex 20
Technologies clés : 23

Neurelec

Entreprise
04 93 95 18 18
http://pro.neurelec.com/fr/inscription
2720 Chemin de Saint-Bernard Porte,
06224 Vallauris
Technologies clés : 31

Optimum Tracker

Entreprise
04 13 41 97 05
contact@optimum-tracker.com
ARTEPARC de Meyreuil, Bât A, Route
de la Côte d'Azur, 13590 MEYREUIL
Technologies clés : 42

Optitec

Pôle de compétitivité
04 91 05 59 69
contact@pole-optitec.com
C/o LAM, Technopôle de Château
Gombert, 38, rue F. Joliot Curie,
13388 Marseille cedex 13
Technologies clés : 2

Pellenc ST

Entreprise
04 90 09 47 90
contact@pellencst.com
http://www.pellencst.com/contactfr/
125, rue François Gernelle – BP 124
84124 Pertuis Cedex 4
Technologies clés : 2

Plateforme Mallabar

Métabolomique Appliquée à L'étude
de LA Biodiversité mARine
Académique
Réseau
04 91 04 16 29
thierry.perez@imbe.fr
Aix-Marseille Université - Campus
Étoile Faculté des Sciences St-Jérôme
Case 421 Av Escadrille Normandie
Niemen 13 397 Marseille cedex 20
Technologies clés : 18

Pôle Mer Méditerranée

Pôle de compétitivité
04 94 03 89 03
contact@polemermediterranee.com
http://www.polemermediterranee.
com/Informations/Contact
229 Chemin de la Farlède,
83507 La Seyne-sur-Mer
Technologies clés : 43

Primi

Cluster
04 91 05 81 04
http://www.primi.pro/menu-utilisateur/
contact
PÔLE MEDIA BELLE DE MAI 37 rue
Guibal 13003 Marseille
Technologies clés : 47

Risques

Pôle de compétitivité
04 42 12 30 50
Domaine du Petit Arbois - Bâtiment
« Henri POINCARÉ » - 1^{er} étage /
Avenue Louis Philibert - 13857 AIX
EN PROVENCE Cedex 3
Technologies clés : 2

Siniat

Entreprise
04 32 44 44 44
http://www.siniat.fr/contact/
500 rue Marcel Demonque -
84915 Avignon
Technologies clés : 38

Supersonic Imagine

Entreprise
04 42 99 24 32
contactsFR@supersonicimagine.com
Les Jardins de la Duranne - Bât E & F -
510 Rue René Descartes 13857
Aix-en-Provence
Technologies clés : 14

Wiko

Entreprise
04 88 08 95 15
1, rue Capitaine Dessemond, 13007
Marseille
Technologies clés : 13

BELLE DE MAI

Incubateur
04 95 04 67 30
celine.souliers@belledemai.org
Pôle Medias
37 rue Guibal
13003 Marseille
Technologies clés :

BPI Provence-Alpes-Côte-d'Azur

BPI
04 91 17 44 00
http://contact.bpifrance.fr/#
141, avenue du Prado BP 265 13269
Marseille Cedex 08
Technologies clés :

IDMED

Start-up
04 91 11 87 84
info@idmed.fr
Hôtel Technoptic 2 rue Marc Donadille
13013 Marseille
Technologies clés :

Impulse

Incubateur
04 91 10 01 45
m.defous@incubateur-impulse.com
MDI Technopole de Château Gombert
Rue Frédéric Joliot Curie
13452 Marseille Cedex 02
Technologies clés :

PACA Est

Incubateur
04 89 86 69 10
masson@incubateurpacaeest.org
c/o CAEI
Immeuble Prémium Bât. A 2^{ème} étage
1 boulevard Maurice Slama
06200 Nice
Technologies clés :

PASS

Parfums Arômes Senteurs Saveurs
Pôle de compétitivité
04 92 42 34 84
contact@pole-pass.fr
http://www.pole-pass.fr/contact/
contact.html
48, avenue Riou Blanquet - B.P. 21017
- 06131 Grasse Cedex
Technologies clés : 8

SATT Sud-Est

SATT
04 91 91 91 20
http://www.sattse.com/contact/par-
email-2/
8 rue Sainte Barbe, CS 10422
13205 Marseille Cedex 01
Technologies clés :

Terralia

Pôle de compétitivité
04 32 40 37 60
http://www.pole-terralia.com/fr/
contact.html
Cité de l'Alimentation - Technopole
Agroparc - Rue Pierre Bayle BP 11548
- 84 916 AVIGNON cedex 9
Technologies clés : 27, 28

Giordano Industrie

Entreprise
04 42 84 58 00
contact@giordano.fr
http://www.giordano.fr/demande-
de-documentation
529 Avenue de la Fleuride, 13400
Aubagne
Technologies clés : 40

DIRECCTE Provence-Alpes-Côte

d'Azur
DIRECCTE
04 86 67 32 00

paca-polec@direccte.gouv.fr
http://www.paca.direccte.gouv.fr/
accueil-15
Pôle C Hôtel des Finances du Prado
23/25, rue Borde CS 10009
Technologies clés :

RÉUNION**Cofely Endel - Réunion**

Entreprise
R&D
02 62 91 93 83
service.communication@cofelyendel-
gdfsuez.com
105 all de Montaignac ZA Les Sables,
97427 ETANG SALÉ
Technologies clés : 15

TECHNOPOLE DE LA REUNION

Incubateur
02 62 90 71 90
innovation@technopole-reunion.com
Parc Technor - 1 rue Emile Hugot
Bâtiment B
97490 Sainte Clotilde
Technologies clés :

RHÔNE-ALPES**CEA LETI**

Laboratoire d'Electronique
et de Technologie de l'Information
Institut Carnot
04 38 78 44 00
CEA Grenoble, 17, rue des Martyrs,
38054 GRENOBLE Cedex 09
Technologies clés : 2, 5, 7, 10, 12,
14, 18, 33, 36, 45, 46

Energies du Futur

Institut Carnot
04 76 82 62 93
Institut Carnot Energies du futur,
Domaine Universitaire-BP 46 38402,
Saint Martin d'Hères Cedex
Technologies clés : 2, 9, 22, 23, 24,
25, 26, 41, 42

Minalogic

Pôle de compétitivité
04 38 78 19 47
contact_at_minalogic.com
Maison Minatec, 3 Parvis Louis Néel,
38054 Grenoble Cedex 9
Technologies clés : 2, 4, 5, 7, 12,
22, 45, 46

Axelera

Pôle de compétitivité
04 78 77 83 64
info@axelera.org
La Cité des Entreprises 66 avenue Jean
Mermoz 69351 LYON Cedex 08
Technologies clés : 8, 15, 16, 26,
35, 37, 41

ONERA

L'Office National d'Études
et de Recherches Aéronautiques
Institut Carnot
04 79 20 21 22
Chef Lieu, 73500 Avrieux, France
Technologies clés : 1, 4, 7, 10, 12,
20, 45

CEA LITEN

Laboratoire d'Innovation pour les
Technologies des Energies Nouvelles
04 38 78 32 70
http://www-liten.cea.fr/fr/liten/
contact.php
17 rue des martyrs 38054 Grenoble
cedex 9
Technologies clés : 8, 16, 24, 25,
41, 42

Tenerdis

Pôle de compétitivité
04 76 51 85 34
http://www.tenerdis.fr/fr/contact.html
Polytec 19, rue des Berges 38024
Grenoble Cedex
Technologies clés : 23, 24, 25, 40,
41, 42

Electropôle - Schneider Electric

Entreprise
04 76 57 60 60
http://www2.schneider-electric.com/
sites/corporate/fr/finance/agenda/
contact/contact-actionnaires.page
31 RUE MENDES FRANCE 38EQI
ELECTROPOLE

38320 EYBENS

Technologies clés : 7, 25, 35, 42, 46

Imaginove

Pôle de compétitivité
04 37 56 89 01
contact@imaginove.fr
26 rue Emile Decorps, 69100
Villeurbanne
Technologies clés : 4, 11, 12, 14, 47

Logiciel et Systèmes Intelligents

Institut Carnot
04 76 00 78 30
contact@carnot-lsi.com
Centre des Technologies du Logiciel
(CTL) Zi de Mayencin, Allée de
Palestine 38610 Gières
Technologies clés : 7, 19, 20, 45

LUTB

LUTB Transport & Mobility Systems
Pôle de compétitivité
04 72 40 57 00
Chambre de Commerce et d'Industrie
de LYON, Place de la Bourse 69289
LYON CEDEX 02
Technologies clés : 10, 12, 20, 45

Solvay

Entreprise
04 72 89 67 89
http://www.solvay.fr/fr/contact/
contact-form-communication.html
85 Avenue des Frères Perret, 69190
Saint-Fons
Technologies clés : 8, 9, 16, 23
Biomérieux
Entreprise
04 78 87 20 00
5, rue des Aqueducs 69290 Craaponne

Technologies clés : 15, 18, 18

Cityzen Sciences

Start-up
04 11 91 60 80
contact@cityzensciences.fr
208 rue Garibaldi 69003 LYON-France
Technologies clés : 1, 2, 5

I@L

Ingénierie at Lyon
Institut Carnot
04 72 29 15 69
66 Boulevard Niels Bohr, 69100
Villeurbanne
Technologies clés : 10, 12, 16

IRT NanoElec

IRT
contact@irtnanoelec.fr
17 rue des Martyrs 38054 Grenoble
cedex 9
Technologies clés : 7, 45, 46

LyonBiopôle

Pôle de compétitivité
04 72 76 53 30
info@lyonbiopole.com
Bâtiment Domilyon - 321, avenue Jean
Jaurès - 69007 Lyon
Technologies clés : 14, 15, 26

Schneider Electric

Entreprise
04 76 57 60 60
http://www.schneider-electric.fr/sites/
france/fr/general/contact/contact.page
51 RUE DES BERGES 38ACG -
POLYTEC
38000 GRENOBLE
Technologies clés : 2, 11, 40

Supergrid

ITE
contact@supergrid-institute.com
http://www.supergrid-institute.com/fr/
nous-contacter
130 rue Léon Blum, BP 1321
69611 Villeurbanne CEDEX
Technologies clés : 22, 42, 43

SYROBO

Association
04 37 23 67 61
1 rue du Dr Fleury-Pierre Papillon,
69100 Villeurbanne
Technologies clés : 10, 12, 21

Plastipolis

Pôle de compétitivité
04 74 12 19 23

http://www.plastipolis.fr/pole/
contactez-nous/
Maison des Entreprises - 180, rue
Pierre et Marie Curie BP 10029 -
Bellignat 01115 Oyonnax CEDEX
Technologies clés : 1, 8

Total

Entreprise
04 78 02 03 55
http://www.total.com/fr/formulaire-
de-contact
Chemin Canal
69360 Solaize
Technologies clés : 15, 24, 41

Adocia

Entreprise
04 72 61 06 10
115 avenue Lacassagne, 69003 Lyon
Technologies clés : 1, 31

Akeo+

Entreprise
04 74 35 60 72
info@akeoplus.com
769 RUE DE LA OUTARDE 01500
CHATEAU GAILLARD
Technologies clés : 10, 12

BIOMAE

Start-up
04 37 43 13 79
contact@biomae.fr
Hébergement IRSTEA - Centre de Lyon
- Villeurbanne - 5, rue de la Doua 69
100 Villeurbanne
Technologies clés : 35, 36

CETIAT

Centre Technique des Industries
Aérouliques et Thermiques
CTI
04 72 44 49 00
http://www.cetiat.fr/fr/contact/
formulaire.cfm
Domaine Scientifique de la Doua, 25
avenue des Arts BP 52042, 69603
VILLEURBANNE cedex
Technologies clés : 25, 40

CITIA

Cité de l'Image en Mouvement
Association
info@citia.org
http://www.citia.org/contact
c/o Conservatoire d'art et d'histoire
18 avenue du Trésum, BP 399
74013 ANNECY Cedex, France
Technologies clés : 11, 47

Ethera

Start-up
04 38 12 29 90
info@ethera-labs.com
7, Parvis Louis Néel CS20050 F-38040
Grenoble Cedex 9
Technologies clés : 2, 36

i-Care

Cluster
04 72 72 70 60
contact@i-carecluster.org
321 Avenue Jean Jaurès, 69007 Lyon
Technologies clés : 2, 9

IDEEL

ITE
http://www.ideel-factory.fr/fr/contact.
html
Rond-Point de l'échangeur, Les Levées,
69360 Solaize
Technologies clés : 8, 41

INES

Institut national de l'énergie solaire
Académie
04 79 79 20 00
info@ines-solaire.org
Technopôle Savoie technolac,
50 Avenue du Lac Léman,
73370 Le Bourget-du-Lac
Technologies clés : 40, 42

MINATEC

Académie
04 38 78 19 19
communication@minatec.org
3 parvis Louis Néel 38054 F-Grenoble
cedex 9
Technologies clés : 18, 46

PEP

Centre technique de la plasturgie et des composites
CTI
04 74 81 92 60
info@poleplasturgie.com
2, rue Pierre et Marie Curie BP 1204
BELLIGNAT - 01117 OYONNAX CEDEX
Technologies clés : 1, 9

Schneider Electric Electropole

Entreprise
R&D
04 76 57 60 60
http://www.schneider-electric.fr/sites/france/fr/general/contact/contact.page
1 RUE MENDES FRANCE 38EQI
ELECTROPOLE - 38320 EYBENS
Technologies clés : 22, 35

Somfy

Entreprise
04 50 96 70 00
50 avenue du Nouveau Monde, 74307
Cluses Cedex
Technologies clés : 2, 40

Tornier

Entreprise
04 76 61 35 00
http://www.tornier.com/index.php?option=com_content&task=view&id=661
161, rue Lavoisier. 38330 Montbonnot
Saint Martin. France
Technologies clés : 1, 31

Total - Sunpower

Entreprise
01 41 35 40 00
12, Allée du Levant 69890 La Tour-de-Salvagny
Technologies clés : 40, 42

Trixell

Entreprise
04 76 57 41 00
460 Rue du Pommarin, 38430
Moirans
Technologies clés : 14, 46

Tronics Microsystems

Entreprise
04 76 97 29 50
info@tronicsgroup.com
98 rue du Pré de l'Horre 38926
CROLLES Cedex
Technologies clés : 2, 46

Université Joseph Fourier - Master EEATS

Académique
04 76 51 46 00
phitem.master.eeats@ujf-grenoble.fr
https://www.ujf-grenoble.fr/contact
621 Avenue Centrale, 38041 Saint-Martin-d'Hères
Technologies clés : 46

Docea Power

Groupe Intel corporation
Entreprise
04 27 85 82 62
info@doceapower.com
166B, rue du Rocher de Lorzier 38430
Moirans
Technologies clés : 4

LMA

Laboratoire des Matériaux avancés,
Université de Lyon, CNRS
Académique
04 72 43 26 76
n.gibelin@lma.in2p3.fr
Bâtiment Virgo
7, Avenue Pierre de Coubertin
69622 - VILLEURBANNE Cedex
69100 VILLEURBANNE
Technologies clés : 1

Mathym

Entreprise
04 72 72 89 63
morgann.donney@mathym.com
L'Espace Européen, Bât G - 15 chemin
du Saquin 69130 Ecully
Technologies clés : 1

Nanoceram

Entreprise
04 76 52 19 25
http://www.nanoceram.net/index.php/

contactez-nous

6 Rue de la Métallurgie, 38420
Domène
Technologies clés : 1

Siléane

Entreprise
04 77 79 03 71
http://www.sileane.com/contact
23 rue Descartes 42000 Saint Etienne
Technologies clés : 12

CETIM

Institut Carnot
04 77 79 40 42
http://www.cetim.fr/fr/Le-Cetim/
Contactez-nous
7, rue de la Presse - CS 50802
42952 Saint-Étienne Cedex 1
Technologies clés : 9

2G Métrologie

Entreprise
04 76 09 19 05
2gmetrologie@wanadoo.fr
5 allée docteur Calmette 38130
ECHIROLLES
Technologies clés : 36

3D-Oxides

Entreprise
04-50-42-65-43
info@3d-oxides.com
170 rue Gustave Eiffel , Technoparc,
01630 Saint Genis Pouilly
Technologies clés : 1

4D View Solutions

Entreprise
09 67 40 48 78
contact4dv@4dviews.com
12, rue Ampère - 38000 Grenoble
Technologies clés : 47

Aldes

Entreprise
04 78 77 15 15
http://www.aldes.fr/contacts/index/create
AXPIR TEMPERATION ACTA ISONE
20 BOULEVARD IRENE JOLIOT CURIE
69200 VENISSIEUX
Technologies clés : 40

Artelia

Entreprise
04 72 12 39 40
artelia@arteliagroup.com
2, avenue Lacassagne 69425 Lyon
Cedex 03
Technologies clés : 22

Association Jessica France

Cap'ronic
Association
04 38 78 38 17
CEA Grenoble, 17, rue des Martyrs,
38054 GRENOBLE Cedex 9
Technologies clés : 2

Association PTM

Pôle des technologies médicales
Association d'industriels
04 77 91 16 65
ptm@pole-medical.com
3 rue de la Productique, 42000 Saint-Étienne
Technologies clés : 31

Asteralis

Entreprise
04 37 20 13 70
contact@asteralis.fr
556, chemin de l'Isilon 38670 -
CHASSE-SUR-RHÔNE
Technologies clés : 44

Awabot

Entreprise
04 37 23 67 60
contact@awabot.com
1 rue Docteur Fleury Papillon 69100
Villeurbanne
Technologies clés : 12

Bastide Bondoux

Entreprise
04 78 16 07 16
http://www.bastide-bondoux.fr/
contact.php
La Cité de l'Environnement 355 allée
Jacques Monod 69800 SAINT-PIERRE
Technologies clés : 40

Bayer CropSciences - Centre de recherche de Lyon

Entreprise
R&D
https://www.bayer.fr/contact
Bayer SAS
Bayer CropScience
Centre de Recherche de La Dargoire
14, impasse Pierre Baizet
CS 99163
69263 Lyon Cedex 09
Technologies clés : 27

Be Spoon

Entreprise
04 57 12 96 35
contact@bespoon.com
17 rue du lac Saint-André, Savoie
Technolac, BP402, 73372 Le Bourget
du Lac
Technologies clés : 12

Bioaster

IRT
04 69 84 26 00
contact@bioaster.org
Bâtiment Domilyon - 321 avenue
Jean-Jaurès 69007 Lyon
Technologies clés : 18

Biotope

Entreprise
04 75 60 09 31
info@biotope.fr
Passage des 4 saisons - Livron-sur-Drôme 26250
Technologies clés : 27

Cap'Tronic

Association
04 38 78 38 17
http://www.captronic.fr/Contactez-nous.html
CEA Grenoble - 17, rue des Martyrs
38054 GRENOBLE Cedex 9
Technologies clés : 7

CEA-UJF Inac

Institut nanoscience et cryogénie
Académique
04 38 78 31 64
jerome.planes@cea.fr
17, rue des Martyrs
38054 GRENOBLE
Technologies clés : 8

Cegid

Entreprise
http://www.cegid.fr/demande-de-contact-corporate/0-1-r1-1500.aspx
52 quai Paul Sédallian 69279 LYON
CEDEX 09
Technologies clés : 4

Centre d'immunologie Pierre Fabre

Entreprise
R&D
04 50 35 35 55
http://www.cipf.com/fr/contacter-le-cipf
5, avenue Napoléon III - BP 60497 -
74164 St Julien-en-Genevois Cedex
Technologies clés : 15

CETHIL

Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon
Académique
04 72 43 64 27
jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
Bâtiment Sadi-Carnot
9, rue de la Physique
INSA de LYON
Campus La Doua - LyonTech
69621 Villeurbanne Cedex
Technologies clés : 41

Chanvribloc

Entreprise
04 76 30 93 00
http://chanvribloc.com/nous-contacter/
ZI des Marais 38350 LA MURE
Technologies clés : 39

CIAT

Compagnie Industrielle d'Applications
Thermiques
Groupe d'industriels
04 79 42 42 42
info@ciat.com
700 avenue Jean Falconnier - BP 14 -

01350 Culoz
Technologies clés : 40

Clipsol

Groupe Engie
Entreprise
http://www.clipsol.com/nous-contacter.html
PAE Les Combaruches 73100 Aix-les-Bains
Technologies clés : 40, 42

Coboteam

Cluster
06 51 07 73 80
fh@thesame-innovation.com
20, avenue du Parmelan, 74041,
Annecy Cede
Technologies clés : 12

Cobs

Charpentier et Ouvrage Bois de Savoie
04 79 54 16 02
info@cobs.fr
Chemin d'Orly 74310 ALBENS
Technologies clés : 39

Colas Environnement

Entreprise
http://www.colas-environnement.com/colas-environnement-depollution-dardilly-contact-15
Bureau de Lyon - Agence Pollution Service
8 chemin du Jubin - 69570 Dardilly
Technologies clés : 37

Corys Tess

Entreprise
04 76 28 82 00
coryscom@corys.fr
44 rue des Berges 38024 Grenoble
Cedex 01
Rhône-Alpes
Technologies clés : 4

CPE Lyon

École d'ingénieurs en Chimie,
Physique et Electronique
Académique
04 72 43 17 00
http://www.cpe.fr/-Contactez-nous-.html
Domaine Scientifique de la Doua
Bâtiment Hubert Curien
43, boulevard du 11 Novembre 1918
BP 82077 - 69616 Villeurbanne Cedex
Technologies clés : 11

CTP

Centre Technique du Papier
CTI
04 76 15 40 15
http://www.webctp.com/fr/centre-technique-du-papier-contact.cfm
Domaine Universitaire - CS 90251 -
38044 GRENOBLE - Cedex 9
Technologies clés : 24

Cytoo

Entreprise
04 38 88 47 05
Minatex - BHT - Bât. 52 - 7 parvis
Louis Néel 38040 Grenoble cedex 9
Technologies clés : 18

Digisens

Entreprise
04 79 65 89 16
info@digisens3d.com
19, Rue Lac Saint André
73370 Le Bourget-du-Lac
Technologies clés : 4

EC2 Modélisation

Entreprise
04 37 48 84 08
contact@ec2-modelisation.fr
Campus LyonTech la Doua - 66,
bd Niels Bohr - CS 52132 - 69603
Villeurbanne Cedex
Technologies clés : 4

ECA

Environnement et Chimie Appliquée
Entreprise
04 78 77 97 64
contact@eca-europe.com
118, avenue du Général Frère - 69008
Lyon
Technologies clés : 15

ECM Technologies

Entreprise
04 76 49 65 60
<http://www.ecm-furnaces.com/new-furnace>
46 rue Jean Vaujany - Technisud
38029 Grenoble - France
Technologies clés : 42

EDF ENR PWT

EDF PhotoWatt
Entreprise
R&D
04 74 93 80 20
<http://www.photowatt.com/panneaux-solaires/vente-panneau-photovoltaïque/fabricant-panneaux-solaires.html>
33 Rue Saint-Honoré,
38300 Bourgoin-Jallieu
Technologies clés : 42

Electricfil

EFI Automotive
Entreprise
04 72 01 34 34
7 Allée des Grandes Combes -
Beynost, 01700 Miribel
Technologies clés : 2

Elicityl

Entreprise
04 76 40 71 61
<http://www.elocity-oligotech.com/?fond=contact>
746 avenue Ambroise Croizat -
F-38920 Crolles
Technologies clés : 27

EliFrance

Entreprise
04 77 46 38 00
443 Rue René Cassin,
42350 La Talaudière
Technologies clés : 42

Emasolar

Entreprise
04 78 86 97 75
info@emasolar.com
ZA Les Grands Chênes,
Rue de Chapoly,
69290 Saint-Genis-les-Ollières
Technologies clés : 42

Enerbee

Entreprise
contact@enerbee.fr
7 parvis Louis Néel - CS 20050 -
38040 Grenoble Cedex 9
Technologies clés : 46

Energy Pool

filiale de Schneider Energy
Entreprise
04 88 13 16 60
<http://www.energy-pool.eu/contact/>
Savoie Technolac 20 Rue Lac Majeur,
Bâtiment C - Parc Ouragan BP324 -
73377 Le Bourget du Lac Cedex
Technologies clés : 22

Enexco

Entreprise
04 30 78 63 30
contact@enexco.fr
18, quai Général Sarraill 69006 LYON
Technologies clés : 36

Engie - Cylergie

Entreprise
R&D
04 72 86 09 80
<http://www.engie.com/contact/>
bât L L Oree d Ecully chem Forestière,
69130 ECULLY
Technologies clés : 22, 41

Erytech Pharma

Entreprise
04 78 74 44 38
<http://erytech.com/contacts/>
Batiment Adénine- 60, avenue
Rockefeller – 69008 LYON
Technologies clés : 15

ESFR

Académie
04 76 88 20 00
<http://www.esfr.eu/about/ask-an-expert/askExpertForm>
ESRF, 71 avenue des Martyrs, 38000

Grenoble

Technologies clés : 14**Exagan**

Entreprise
04 38 78 33 07
<http://www.exagan.com/en/contacts/>
c/o Minatec Entreprises - BHT -
7 parvis Louis Néel - 38040 Grenoble
Cedex 9
Technologies clés : 46

Exceltec

Entreprise
06 98 05 34 46
exceltec@exceltec.eu
Espace mi-plaine, 20 Avenue
des Frères Mongolfier F-69680
Chassieu FRANCE
Technologies clés : 9

Fondation Nanosciences

réseau thématique de recherche
avancée
Réseau
04 56 52 96 28
feriel.kouiten@fondation-nanosciences.fr
23 rue des Martyrs - 38000 Grenoble
Technologies clés : 46

G2Elab

Académie
04 76 82 62 99
direction@listes.g2elab.grenoble-inp.fr
ENSE3 bat D, 11, rue des
Mathématiques BP 46, 38402 St
Martin d'Hères Cedex
Technologies clés : 22

Genel

Entreprise
06 28 25 25 29
<http://www.genel.fr/get-in-touch/contact/>
c/o GATE1, 31 Rue Gustave Eiffel
38000 Grenoble, France
Technologies clés : 46

GMPProd

Entreprise
04 37 23 33 33
contact@gm-prod.eu
Bâtiment A, 4 rue Edouard Aynard,
69100 Villeurbanne
Technologies clés : 9

Grenoble INP

Académie
04 76 57 45 00
46 avenue Félix Viallet 38031
Grenoble Cedex 1
Technologies clés : 46

GRETH

Groupement pour la recherche
sur les échangeurs thermiques
Académie
04-79-25-48-03
<http://www.greth.fr/public/contact.php>
Bâtiment PASSERELLE 7 - 30 Allée
d'Aiguebelette - Savoie Technolac -
73375 LE BOURGET DU LAC - CEDEX
Technologies clés : 41

Hevatech

Entreprise
04 26 51 52 78
<http://www.hevatech.fr/nous-contacter.html>
145 Chemin de la Roche du Guide
- Espace Combelière Sud - 26780
Malataverne
Technologies clés : 41

Hydreca

Entreprise
04 72 53 11 53
<http://www.hydreca.com/fr/formulaire-de-contact>
34 route de Saint Romain 69450
Saint Cyr Au Mont D'or
Technologies clés : 35

INSA Lyon

Académie
04 72 43 83 83
<http://www.insa-lyon.fr/fr/contact>
20, avenue Albert Einstein , 69621
Villeurbanne Cedex
Technologies clés : 14

Institut des Neurosciences

Académie
04 56 52 05 00
Bâtiment Edmond J. Safra, Université
Joseph Fourier - Site Santé, Chemin
Fortuné Ferrini, 38706 La Tronche
Technologies clés : 14

ISKN

Entreprise
contact@iskn.co
52 Cours Jean Jaurès 38000 Grenoble
Technologies clés : 47

Isorg

Entreprise
04 38 78 10 11
http://www.isorg.fr/contactez-nous_6.htm
MINATEC - Bâtiment de Haute
Technologie (Bat. 52), 7 parvis Louis
Néel BP 50 - 38040 Grenoble Cedex
09
Technologies clés : 46

LBTI

Laboratoire de Biologie Tissulaire
et d'ingénierie Thérapeutique
Académie
04 72 72 26 36
bernard.verrier@ibcp.fr
7 Passage du Vercors - 69367 Lyon
Technologies clés : 29

LEPMI

Laboratoire d'Electrochimie
et de Physicochimie des Matériaux
et des Interfaces
Académie
04 76 82 66 98
1130 rue de la piscine 38402 Saint-
Martin d'Hères cedex
Technologies clés : 23

MabDesign

Structure d'interface
09 55 91 30 26
Bâtiment Domilyon - 321, avenue
Jean Jaurès, F. 69007 – Lyon
Technologies clés : 15

McPhy Energy

Entreprise
04 75 71 15 05
contact@mcphy.com
Z.A. Quartier Riétière -
26190 La Motte-Fanjas
Technologies clés : 25

MediCréa

Entreprise
04 72 01 87 87
<http://www.medicrea.com/nous-contacter/service-commercial/>
24 Port Grand Lyon, 01700 Neyron
Technologies clés : 9

Metaboly

Entreprise
04 78 77 86 65
baverel@metaboly.com
12 rue Guillaume Paradin , Faculte
de Medecine Rth, 69372 Lyon
CEDEX 07
Technologies clés : 18

MicrooLed

Entreprise
04 38 88 47 29
info@microoled.net
BHT BATIMENT 52, 7 PARVIS LOUIS
NEEL - BP 50 - 38000 GRENOBLE
Technologies clés : 46

NEEL

Académie
04 76 88 10 21
neel.contact@neel.cnrs.fr
CNRS/UJF UPR2940 - 25 rue des
Martyrs BP 166 - 38042 Grenoble
cedex 9
Technologies clés : 46

Noraker

Entreprise
04 78 93 30 92
contact@noraker.com
13 Av. Albert Einstein 69100
Villeurbanne
Technologies clés : 1

Novamotion

Entreprise
04 50 62 16 19

info@novamotion.com
32, Rue de Sansy - 74600 Seynod
- France
Rhône-Alpes
Technologies clés : 47

One Ortho

Entreprise
infos@oneortho-medical.com
Oneortho Batiment des hautes
technologies, 20 rue du professeur
Benoît Lauras 42 000 Saint Etienne
Technologies clés : 9

Optic Rhône Alpes

Cluster
04 28 07 01 75
contact@pole-ora.com
Bâtiment des Hautes Technologies
20, rue Pr. Benoit Lauras - 42 000
SAINT-ETIENNE
Technologies clés : 46

Plastic Omnium

Entreprise
01 40 87 64 00
19 AVENUE JULES CARTERET 69007
LYON
Technologies clés : 1

Pôle EcoConception

Cluster
04 77 43 04 85
diarra.kane@eco-conception.fr
57 cours Fauriel 42024 Saint-Etienne
Cedex 2
Technologies clés : 39

Pôle Innovation Constructive

Cluster
04 74 95 24 00
<http://www.pole-innovations-constructives.com/11-contact.htm>
c/o Chambre de Commerce et
d'Industrie Nord Isère - 5 rue
Condorcet 38090 VILLEFONTAINE
Technologies clés : 39

Prelem

Entreprise
Bureau d'étude / Certification
04 78 68 94 77
contact@prelem.com
170 boulevard Stalingrad 69451 Lyon
cedex 06
Technologies clés : 40

Primo 1D

Entreprise
04 38 78 05 01
<http://primo1d.com/contact/>
c/o MINATEC Entreprises – BHT - 7,
parvis Louis Néel F- 38040 Grenoble
Cedex 9
Technologies clés : 46

PV Alliance

issue d'EDF et CEA
Start-up
04 74 93 44 45
<http://www.pvalliance.com/fr/contact/>
33, Rue Saint Honoré - ZI Champfleuri
38300 Bourgoin-Jallieu
Technologies clés : 46

Recupyl

Start-up
04 76 77 43 97
contactinfo@recupyl.com
Rue de la métallurgie 38420 Domène
Technologies clés : 16

Réseau RECORD

Réseau coopératif de recherche sur
les déchets
Académie
04 72 43 81 88
contact@record-net.org
Campus LyonTech La Doua, 66,
boulevard Niels Bohr CEI 1 - CS 52132
- 69603 VILLEURBANNE Cedex
Technologies clés : 37

Resolution Spectra Systems

Entreprise
04 58 00 12 49
13, chemin du vieux chène, F-38240
MEYLAN
Technologies clés : 2

RMN Biomédical et Neurosciences

Académie
04 76 76 54 85

JLeBas@chu-grenoble.fr
CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE -
BP 217 X - AVENUE DES MAQUIS
DU GRESIVAUDAN - 38043
GRENOBLE CEDEX 9
Technologies clés : 14

Seb
Entreprise
04 72 18 18 18
LES 4 M - 4 CHEMIN DU PETIT BOIS -
BP 172 - 69130 ECULLY
Technologies clés : 5

Sensus France
Entreprise
04 72 01 85 50
info.fr@sensus.com
Zac du Champ Perrier 41 Porte
du Grand Lyon 01700 NEYRON
Technologies clés : 35

Sentryo
Start-up
09 70 46 96 94
contact@sentryo.net
16 CHE DU SIROUX 69260
CHARBONNIERES LES BAINS
Technologies clés : 13

Serpol
Entreprise
04 72 89 73 75
info@serpol.fr
2 chemin du génie BP80 - 69633
Vénissieux
Technologies clés : 37

Smart Electric Lyon
Académie
projet de l'Université de Lyon
0 969 369 542
http://www.smart-electric-lyon.
fr/#contacter
196, avenue Thiers 69461
LYON CEDEX 06
Technologies clés : 22

Smart me up
Start-up
04 79 33 78 50
contact@smartmeup.org
15, Chemin des Prés - 38240 Meylan
Technologies clés : 11

Soitec
Entreprise
04 76 92 75 00
Parc Technologique des Fontaines,
Chemin des Franques 38190 Bernin
Technologies clés : 46

Soloréa
Entreprise
04 81 92 60 71
info@soloréa.com
2 Place Gailleton, 69002, Lyon
Technologies clés : 42

Sopra Steria
Entreprise
04 50 33 30 30
contact-corp@sopraSteria.com
PAE Les Glaisins, 3 rue du Pré Faucon,
74942 Annecy Le Vieux
Technologies clés : 4

Sysoco
Entreprise
04 72 14 53 10
contact-mk@sysoco.fr
http://www.sysoco.fr/KERNEL?NODE_
ID=B3EF0E34-7813-4C4E-8A3A-
5378F3D81815&DB=CLT3&U=
DC5AB262-634F-422B-9D27-
B7BC29A08D03
36 Rue Vaucanson - CS20815 - 69153
DECINES Cedex
Technologies clés : 13

Techtera
Pôle de compétitivité
04 20 30 28 80
http://www.techtera.org/
contact?menu=134
Villa Créatis - 2 rue des Mûriers -
CP 601 - 69 258 Lyon cedex 09
Technologies clés : 1

TheCosmocompany
Start-up
Spin-off ENS Lyon/CNRS

04 37 66 71 57
http://www.thecosmocompany.
com/#!moreinformation/cqyk
5 passage du Vercors, 69007 Lyon
Technologies clés : 4

Tiempo
Entreprise
04 76 61 10 00
web-contact@tiempo-secure.com
110 rue Blaise Pascal - Bâtiment
Viseo - Inovalée 38330 Montbonnot
Saint Martin
Technologies clés : 46

Vesta System
Entreprise
04 58 00 52 25
info@vesta-system.com
22 avenue Doyen Weil 38000
Grenoble
Technologies clés : 46

WH2
Entreprise
04 78 62 21 28
http://www.wh2.fr/index.php/
component/content/article/2-non-
categorise/8-contact
2 rue Président CARNOT - 69002
LYON
Technologies clés : 25

Yseop
Entreprise
04 78 47 07 49
http://yseop.com/FR/contact
62 rue de Bonnel -69003 Lyon
Technologies clés : 11

CTTN/IREN
Institut de Recherche sur l'Entretien
et le nettoyage
CTI
http://www.cttn-iren.com/nettoyage-
industriel/contact-cttn.php
Avenue Guy de Collongue
B.P. 41
69131 Ecully Cedex
Technologies clés :

BPI BPI
04 72 60 57 60
http://contact.bpifrance.fr/#
Immeuble Le 6e Sens 186, avenue
Thiers 69465 Lyon Cedex 06
Technologies clés :

Calym
Consortium pour l'Accélération
de l'Innovation et de son Transfert
dans le Domaine du Lymphome
Institut Carnot
04 72 24 41 71
http://www.calym.org/-Contact-.html
LYSARC - Centre Hospitalier Lyon-Sud,
Secteur Sainte Eugénie, pavillon 6E
69495 PIERRE-BENITE Cedex
Technologies clés : 15, 18, 26, 29

CTDEC
Centre technique du décolletage
CTI
infos@cetim-ctdec.com
Cetim-Ctdec
750 avenue de Colomby
BP 65
74301 CLUSES CEDEX
Technologies clés :

Gate 1
Incubateur
04 76 61 38 00
gilles.talbotier@gate1.fr
Hôtel d'entreprises Petite Halle
31 rue Gustave Eiffel
38000 Grenoble
Rhône-Alpes
Technologies clés :

Ici&Là
Start-Up
06 72 67 89 09
ebrehier@iel-innovation.fr
195 ter rue Marcel Mérieux / 69007
Lyon
Technologies clés :

Incubateur Pulsalys
Incubateur
04 26 23 56 60
cedric.nieutin@pulsalys.fr

47 boulevard du 11 novembre 1918
CS 90170
69625 Villeurbanne cedex
Technologies clés :

Mont-Blanc Industries
Pôle de compétitivité
04 50 18 73 84
http://www.montblancindustries.com/
contact/
750 avenue de Colomby BP 50141
74 303 Cluses CEDEX
Technologies clés : 1

Pulsalys
SATT
04 26 23 56 60
http://www.pulsalys.fr/
contact/#more-379
47 Boulevard du 11 Novembre 1918
CS 90170
69625 VILLEURBANNE Cedex
Technologies clés :

SATT GIFT Grenoble ALPS
SATT
Technologies clés :

Alstom Hydro Power
Entreprise
04 76 39 30 00
http://www.alstom.com/fr/general-
contact-us/
82 Avenue Léon Blum, 38100
Grenoble
Technologies clés : 41, 43, 44, 46

Sofath
Entreprise
04 75 57 30 30
contact@sofath.com
http://www.sofath.com/contact.php
50 rue Pierre Seghers
26800 PORTES LES VALENCES
Technologies clés : 40

Ecometis
Entreprise
04 81 91 92 41
contact@ecometis.com
http://www.ecometis.fr/contact/
La brevenne 69690 Bessenay
Technologies clés : 40

Perge
Entreprise
04 75 57 81 63
http://www.perge.fr/contact
380 Avenue du Président Salvador
Allende, 26800 Portes-lès-Valence
Technologies clés : 40

Barriquand Technologies
Entreprise
04 77 44 22 20
info@barriquand.com
9 Rue Saint-Claude, 42300 Roanne
Technologies clés : 40

CRIS
Centre de Recherche et d'Innovation
sur le Sport
Académie
04 72 43 26 12
cris@univ-lyon1.fr
U.F.R. S.T.A.P.S - Université Claude
Bernard Lyon 1
27, 29 Boulevard du 11 novembre
1918
69622 Villeurbanne
Technologies clés :

DIRECCTE Rhône-Alpes
DIRECCTE
04 26 99 82 75
rhona-polec@direccte.gouv.fr
http://www.rhone-alpes.direccte.gouv.
fr/accueil-18
Tour SWISS LIFE, 1 boulevard Vivier
Merle
Technologies clés :

Saint Pierre et Miquelon

DIECCTE Saint Pierre et Miquelon
DIECCTE
05 08 41 16 30
concurrence@dcstep.gouv.fr
1 rue Ange Gautier BP 4302
Technologies clés :

GdR Robotique
Groupement de Recherche
en Robotique
Association
philippe.bonnifait@hds.utcf.fr
Technologies clés : 10, 12, 21

GIS Modélisation Urbaine
GIS
Réseau
http://www.urban-modelling.org/fr/
liens-utiles/article/contact.html
Technologies clés : 4

AFIA
Association Française pour
l'Intelligence Artificielle
Association
Yves.Demazeau@imag.fr
https://www.linkedin.com/groups/
AFIA-Association-Fran%C3%A7aise-
Intelligence-Artificielle-3870691/
about
Technologies clés : 11

Smart-Grids France
Association de pôles
celine.auger@capenergies.fr
http://smartgridsfrance.fr/#page
Technologies clés : 6

Actémium
groupe Vinci
Réseau d'entreprise
http://www.actemium.fr/fr/secteurs-
dactivite/energie/contact/
Technologies clés : 22

Elicitra
RMT
Réseau
r.berthelot@arvalisinstituduvegetal.fr
http://elicitra.org/index.
php?rub=contacts_des_animateurs
Technologies clés : 27

France Bio Imaging
Infrastructure Nationale
pour la biologie
Réseau
contact@france-bioimaging.org
Technologies clés : 14

France Life Imaging
Infrastructure Nationale
pour la biologie
Réseau
frank.lethimonier@cea.fr
Technologies clés : 14

LCQSA
Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l'Air
GIS
Réseau
03 44 55 64 04
direction-lcsqa@ineris.fr
Technologies clés : 36

**Ligue Scientifique Européenne
pour les Probiotiques**
Réseau
Réseau européen
contact@probioteague.org
Technologies clés : 28

Lora
Association d'industriels
help@lora-alliance.org
LoRa Alliance
2400 Camino Ramon, Suite 375
San Ramon, CA 94583
Technologies clés : 13

Prebat
Plateforme de recherche
et d'expérimentation sur l'énergie
dans le bâtiment
Académique
http://www.prebat.net/?Contact
Technologies clés : 39

RFMF
Réseau Français de Métabolomique
et Fluxomique
Association
Réseau
05 57 12 26 68
rfmf@bordeaux.inra.fr
Technologies clés : 18

SATT Lutec

SATT

01 78 94 68 51

<http://www.sattlutech.com/restons->

[en-contact/](http://www.sattlutech.com/restons-en-contact/)

Technologies clés :

Défis CNRS MASTODONS

Académique

<http://www.cnrs.fr/mi/spip.php?auteur3>

Technologies clés : 3

Membres du Comité stratégique

- Président du Comité : Philippe VARIN, Président d'AREVA
- Vice-présidente : Claudie HAIGNERÉ, Conseiller spécial auprès du Directeur général de l'Agence spatiale européenne
- Olivier APPERT (président, Institut français du pétrole et des énergies nouvelles)
- Martine BRIDENNE (directrice, Institut pour la transition énergétique PSEE)
- Vincent CHARLET (directeur, La fabrique de l'industrie ; ancien directeur, ANRT-Futuris)
- Philippe CHODERLOS DE LACLOS (président-directeur général, CETIM)
- Martha CRAWFORD (directrice R&D, L'Oréal)
- Guillaume DE CREVOISIER (directeur des partenariats technologiques, Protex International)
- Patrice DESMARETS (Académie des technologies)
- Pascal FAURE, Directeur général des entreprises
- Jean-Marc GROGNET (directeur, Institut des technologies pour la santé, CEA DSV)
- Caroline LAURENT (directrice de la stratégie, Délégation générale de l'armement)
- Vincent MARCATTE, Vice-président, Orange Labs ; Président, pôle Images & réseaux)
- Agnès PAILLARD (vice-présidente, EADS France ; présidente, Aerospace Valley)
- Grégoire POSTEL-VINAY (chef de la mission stratégie, DGE)
- Cécile THARAUD (directrice Business Development, L'Oréal)
- Philippe VANNIER (président-directeur général, Bull)

Membres du Comité de pilotage

- Chef de projet : Philippe GUEDON
- Jean-Pierre COUTARD (Service de l'industrie, DGE)
- Elsa DEMANGEON (Service du tourisme, du commerce et des activités de service, DGE)
- Alain GRIOT (Commissariat général au développement durable, MEDDE)
- Philippe GUEDON (Bureau de la recherche-développement partenariale, DGE)
- Frédéric KAROLAK (Service de la compétitivité, de l'innovation et du développement des entreprises, DGE)
- Jean-Michel Le ROUX (Agence nationale de la recherche)
- Noël Le SCOUARNEC (Service de la compétitivité, de l'innovation et du développement des entreprises, DGE)
- Laure MENETRIER (Bureau de la recherche-développement partenariale, DGE)
- Eric PLESKA (Direction général de l'armement)
- Laure REINHART (Directrice des partenariats, Bpifrance)
- Grégoire POSTEL-VINAY (chef de la mission stratégie, DGE)
- Lisa TREGLIA (Direction générale de la recherche et de l'innovation, MENESR)
- Thierry TRIOMPHE (Service de l'économie numérique, DGE)

TECHNOLOGIES CLÉS

2020

Préparer l'industrie du futur

L'étude **Technologies clés 2020** a pour objectif d'identifier les technologies que les acteurs Français doivent maîtriser pour conquérir les marchés mondiaux à l'horizon 2020 et d'en analyser les opportunités en termes de développement économique et de création de valeur pour notre économie. Elle est destinée à offrir des perspectives de développement et des éléments d'aide à la décision en matière de recherche et développement aux chefs d'entreprise, aux acteurs de la recherche académique et aux décideurs publics.

Cette 5^e édition présente 47 technologies clés considérées comme étant stratégiques, du fait de l'importance des marchés adressés et de l'expertise, existante ou potentielle, des acteurs publics et privés français. Elles adressent neuf domaines applicatifs correspondant à neuf grandes catégories de besoins économique et sociétaux.



Direction générale des entreprises

67 Rue Barbès, 94200 Ivry-sur-Seine



entreprises.gouv.fr



DGE
DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES

conception graphique

SG/SIRCOM/BAGE

crédits photographiques

©Fotolia

©Phovoir

TECHNOLOGIES CLÉS

2020



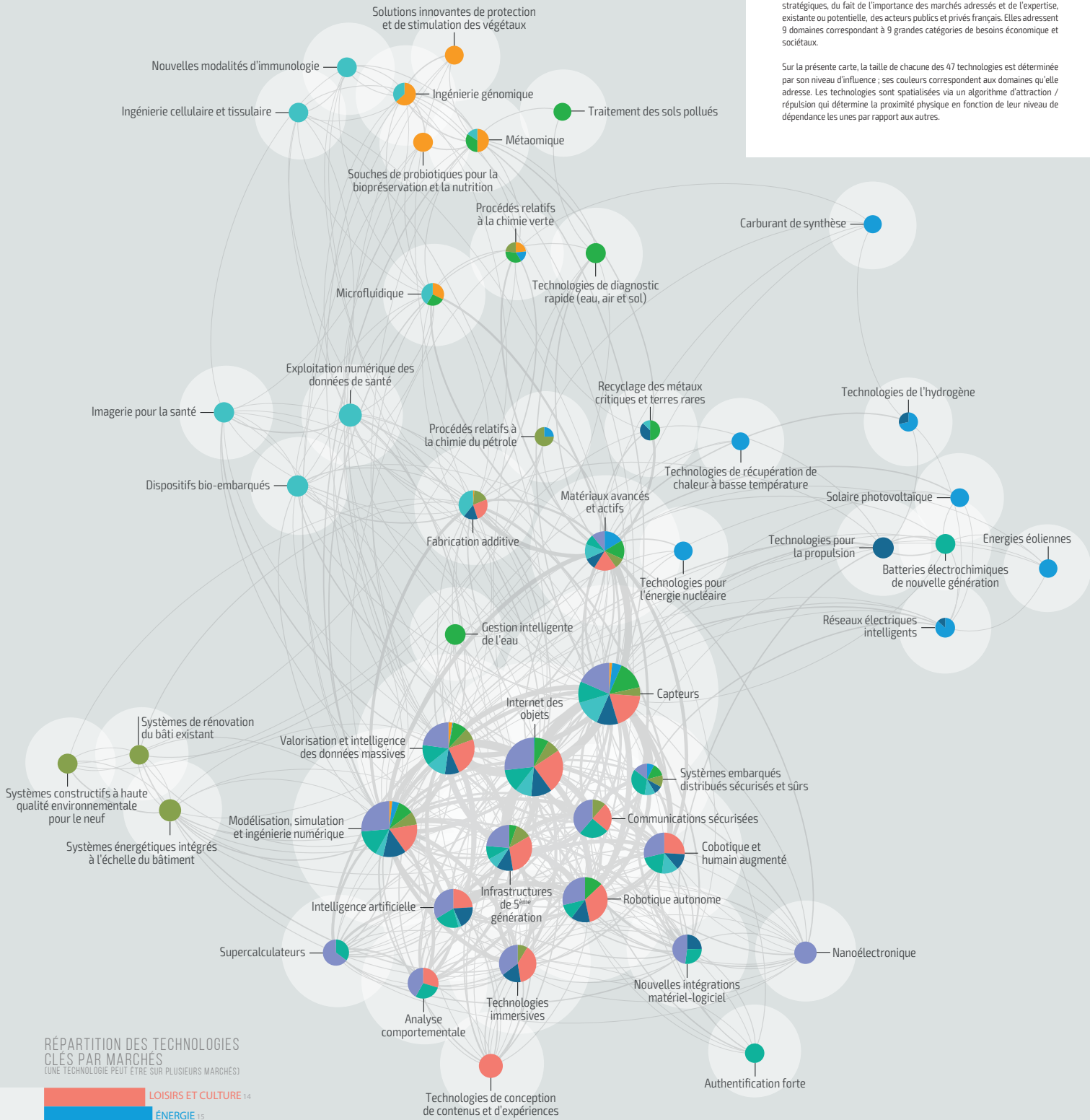
www.entreprises.gouv.fr/technologies-clés-2020

CONTEXTE ET CLÉS DE LECTURE

L'étude Technologies clés 2020 a pour objectif d'identifier les technologies que les acteurs Français doivent maîtriser pour conquérir les marchés mondiaux à l'horizon 2020 et d'en analyser les opportunités en termes de développement économique et de création de valeur pour notre économie. Elle est destinée à offrir des perspectives de développement et des éléments d'aide à la décision en matière de recherche et développement aux chefs d'entreprise, aux acteurs de la recherche académique et aux décideurs publics.

Cette 5ème édition présente 47 technologies clés considérées comme stratégiques, du fait de l'importance des marchés adressés et de l'expertise, existante ou potentielle, des acteurs publics et privés français. Elles adressent 9 domaines correspondant à 9 grandes catégories de besoins économique et sociétaux.

Sur la présente carte, la taille de chacune des 47 technologies est déterminée par son niveau d'influence ; ses couleurs correspondent aux domaines qu'elle adresse. Les technologies sont spatialisées via un algorithme d'attraction / répulsion qui détermine la proximité physique en fonction de leur niveau de dépendance les unes par rapport aux autres.



RÉPARTITION DES TECHNOLOGIES CLÉS PAR MARCHÉS

(UNE TECHNOLOGIE PEUT ÊTRE SUR PLUSIEURS MARCHÉS)

