



ÉTUDES ÉCONOMIQUES

PROSPECTIVE

Mutations économiques du secteur de l'industrie
des métaux non ferreux

Annexe - R & D et innovations technologiques

Date de parution : mars 2015
Couverture : Hélène Allias-Denis, Brigitte Baroin
Édition : Martine Automme, Nicole Merle-Lamoot

ISBN : 978-2-11-138576-4

Mutations économiques du secteur de l'industrie des métaux non ferreux



Annexe : R &D et innovations technologiques



Le Pôle interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations économiques (Pipame) a pour objectif d'apporter, en coordonnant l'action des départements ministériels, un éclairage de l'évolution des principaux acteurs et secteurs économiques en mutation, en s'attachant à faire ressortir les menaces et les opportunités pour les entreprises, l'emploi et les territoires.

Des changements majeurs, issus de la mondialisation de l'économie et des préoccupations montantes comme celles liées au développement durable, déterminent pour le long terme la compétitivité et l'emploi, et affectent en profondeur le comportement des entreprises. Face à ces changements, dont certains sont porteurs d'inflexions fortes ou de ruptures, il est nécessaire de renforcer les capacités de veille et d'anticipation des différents acteurs de ces changements : l'État, notamment au niveau interministériel, les acteurs socio-économiques et le tissu d'entreprises, notamment les PME. Dans ce contexte, le Pipame favorise les convergences entre les éléments microéconomiques et les modalités d'action de l'État. C'est exactement là que se situe en premier l'action du Pipame : offrir des diagnostics, des outils d'animation et de création de valeur aux acteurs économiques, grandes entreprises et réseaux de PME/PMI, avec pour objectif principal le développement d'emplois à haute valeur ajoutée sur le territoire national.

Le secrétariat général du Pipame est assuré par la sous-direction de la Prospective, des Études et de l'Évaluation Économiques (P3E) de la direction générale des Entreprises (DGE).

Les départements ministériels participant au Pipame sont :

- le ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique/Direction générale des Entreprises ;
- le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie ;
- le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt ;
- le ministère de la Défense/Direction générale de l'Armement ;
- le ministère du Travail, de l'Emploi, de la Formation professionnelle et du Dialogue social/Délégation générale à l'Emploi et à la Formation professionnelle ;
- le ministère des Affaires sociales, de la Santé et des Droits des femmes/Direction générale de la Santé ;
- le ministère de la Culture et de la Communication/Département des Études, de la Prospective et des Statistiques ;
- le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche ;
- le Commissariat général à l'Égalité des territoires (CGET), rattaché au Premier ministre ;
- le Commissariat général à la stratégie et à la prospective (CGSP), rattaché au Premier ministre.

Avertissement

La méthodologie utilisée, ainsi que les résultats obtenus, relèvent de la seule responsabilité des prestataires (Sofred Consultants - Erdyn) qui ont réalisé cette étude. Ils n'engagent pas le Pipame, ni l'ensemble des organismes l'ayant demandée (*). Les parties intéressées sont invitées, le cas échéant, à faire part de leurs commentaires à la direction générale des Entreprises (DGE) qui a coordonné le groupement de commandes de cette étude.



- (*) Les organismes ayant demandé cette étude sont :
- le ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique - DGE ;
 - le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie - DGALN ;
 - le ministère des Affaires étrangères et du Développement international - DEEI ;
 - le Commissariat général à l'Égalité des territoires (CGET) ;
 - l'Association française de l'aluminium (AFA) ;
 - l'Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M).

Membres du comité de pilotage

Noël Le Scouarnec	DGE, bureau de l'animation des études et de la prospective
Ange Mucchielli	DGE, bureau de l'animation des études et de la prospective
Alice Métayer-Mathieu	DGE, bureau de l'animation des études et de la prospective
Benoît Rogeon	DGE, bureau des Matériaux
Nolwenn Cezilly	DGE, bureau des Matériaux
Yveline Clain	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature - Bureau des ressources minérales
Rémi Galin	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature - Bureau des ressources minérales
Claire de Langeron	Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M), déléguée générale
Nadia Mandret	Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M), chargée de mission
Caroline Colombier	Association Française de l'Aluminium (AFA), déléguée générale
Cyrille Mounier	Association Française de l'Aluminium (AFA), chargé de mission
Louis Maréchal	Ministère des Affaires étrangères et du Développement international, chargé de mission ressources minérales
Adeline Defer	Ministère des Affaires étrangères et du Développement international, chargée de mission ressources minérales
Paule Porruncini	Commissariat Général à l'Égalité des Territoires (CGET)

La conduite des entretiens et la rédaction du présent rapport ont été réalisées par les cabinets de conseil :

SOFRED CONSULTANTS
114, avenue Charles de Gaulle
92200 Neuilly-sur-Seine Cedex
Tél. : 01 79 62 02 00
Fax : 01 79 62 02 10
www.sofred.fr

ERDYN
23, rue Vergniaud
75013 Paris
Tél : 01 44 16 86 00
Fax : 01 44 16 86 01
www.erdyn.fr

Représentés par :

Laurent Bastian, Sofred Consultants, directeur de mission
Martin Fougerolle, Sofred Consultants, senior
Stéphane Boudin, Erdyn, senior
Jean Martinon, expert

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	13
2. MISE EN PERSPECTIVE EUROPÉENNE.....	15
3. ÉTUDES DE CAS	19
3.1. Hydrométallurgie.....	20
3.2. Métallurgie des poudres	30
3.3. Recyclage	38
3.4. Stockage électrochimique de l'électricité.....	45
3.5. Alliages hautes performances.....	55
3.6. Conducteurs pour les câbles électriques.....	61
4. ANALYSE DE LA POSITION FRANÇAISE DU POINT DE VUE RECHERCHE ET INNOVATION	67
4.1. La position française du point de vue des brevets.....	67
4.2. L'implication des acteurs français dans les projets collaboratifs	69
4.3. La répartition territoriale des acteurs.....	71
4.4. Les orientations territoriales	75
4.5. La formation	76
5. SYNTHÈSE, CONCLUSIONS	79
5.1. Une position française en matière de recherche qui tend à s'éroder	79
5.2. Un effet d'entraînement en matière d'innovation inégal selon les secteurs applicatifs, combiné à une faible visibilité dans les spécialisations territoriales	79
5.3. De nouvelles opportunités offertes par les grands programmes nationaux et internationaux.....	80
5.4. Dans un contexte de relance de la R&D publique.....	81
5.5. ... Mais qui pourraient se révéler insuffisants pour soutenir les activités de recherche et d'innovation de l'industrie des métaux non ferreux dans son ensemble.....	82
6. ANNEXE 1 : LISTE DES ACTEURS ACADÉMIQUES.....	87
7. ANNEXE 2 : LISTE DES LIEUX DE COLLABORATION.....	89
8. ANNEXE 3 : LISTE DES PROJETS RECENSÉS	90
9. ANNEXE 4 : CARTOGRAPHIE DES ACTEURS ET DE LEURS INTERACTIONS.....	94
10. INDEX DES FIGURES	96
11. INDEX DES GRAPHIQUES	98

12. BIBLIOGRAPHIE 99

13. LISTE DES PERSONNES CONSULTÉES 101

1. INTRODUCTION

Les conclusions du volet 1 de la présente étude ont fait ressortir la recherche et l'innovation comme un levier potentiel susceptible de contribuer à l'amélioration de la compétitivité du secteur de l'industrie des métaux non ferreux.

Cette piste fait ici l'objet d'un approfondissement. Il s'agit plus particulièrement :

- d'établir un diagnostic fin de la situation française en matière de recherche et d'innovation dans ce domaine,
- de proposer des pistes d'action prioritaires.

Le diagnostic est effectué à travers six études de cas, ainsi qu'au travers d'une analyse globale de la position française dans un contexte international ; une déclinaison territoriale de ce diagnostic est également proposée.

2. MISE EN PERSPECTIVE EUROPÉENNE

La dépendance de nombreux secteurs manufacturiers vis-à-vis des matériaux métalliques, et en particulier des métaux non ferreux, a été soulignée dans le cadre du premier volet de la présente étude ; de fait, ces derniers sont largement représentés parmi les matières premières identifiées comme « critiques » au niveau européen.

L'importance accordée à ce sujet s'est notamment traduite au niveau des programmes et instruments mis en place au niveau de l'Union Européenne. En matière de recherche et de développement, le programme-cadre baptisé Horizon 2020, qui succède 7^{ème} PCRD, va couvrir la période 2014-2020 ; le détail des thèmes prioritaires identifiés pour la période 2014-2015, qui feront donc l'objet des premiers appels à projets, a été publié en décembre 2013. Les matériaux métalliques sont bien entendu concernés par plusieurs de ces thèmes ; cela concerne avant tout les axes prioritaires à caractère transversal du programme de travail 2014-2015 :

- La priorité 5 (« Leadership in enabling and industrial technologies »), et en particulier la sous-priorité 5.ii (« Nanotechnologies, advanced materials, biotechnology and advanced manufacturing and processing »), dans le cadre de laquelle on identifie des thèmes tels que la fabrication additive (NMP7¹), ainsi que les technologies de récupération des métaux et autres minéraux (SPIRE7), sujet sur lequel la participation des PME est encouragée. D'autres thèmes peuvent aussi se révéler pertinents : les matériaux opérant en conditions sévères (NMP19), les matériaux de substitution aux matériaux critiques (NMP23), les procédés de fabrication pour des structures et géométries complexes (FoF2), la simulation et la modélisation (FoF8), la robotisation des procédés (FoF11), les matériaux pour enveloppes de bâtiments (EeB1), etc., ainsi que, plus généralement, les priorités transversales aux industries de process (notamment SILC II – *Sustainable Industry Low Carbon*).
- La priorité 12 (« Climate action, environment, resource efficiency and raw materials »), avec le thème du recyclage (WASTE3), ainsi que l'ensemble des thèmes regroupés dans la partie « Enabling the sustainable supply of non-energy and non-agricultural raw materials » (SC5-11 à SC5-13), qui couvre aussi bien l'extraction minière que les procédés métallurgiques, ainsi que la coordination des activités de recherche et d'innovation au niveau européen. On peut noter au passage que cette partie fait explicitement référence à la stratégie européenne en matière de matériaux critiques.

C'est également dans le cadre de cette dernière qu'a été mis en place un « partenariat européen pour l'innovation pour les matières premières » (« EIP on Raw Materials »), qui concerne aussi bien les aspects technologiques que non-technologiques. Les priorités portent sur la coordination européenne en matière de recherche et d'innovation (notamment en liaison avec le programme Horizon 2020 et les plateformes technologiques européennes), la production de matières premières (y compris le recyclage), l'accès aux ressources minières européennes, la gestion des déchets au niveau européen, la coopération internationale... On peut noter au passage que l'agenda stratégique en matière de recherche et d'innovation de la plateforme européenne dédiée aux ressources minérales (ETP-SMR : European Technology Platform on Sustainable Mineral Resources) a fait l'objet d'une révision en 2013; elle est organisée autour de cinq « ambitions stratégiques » :

¹¹¹ Ces codes sont ceux utilisés dans les documents publiés par la Commission Européenne. Ils seront ultérieurement repris pour identifier les appels à projets.

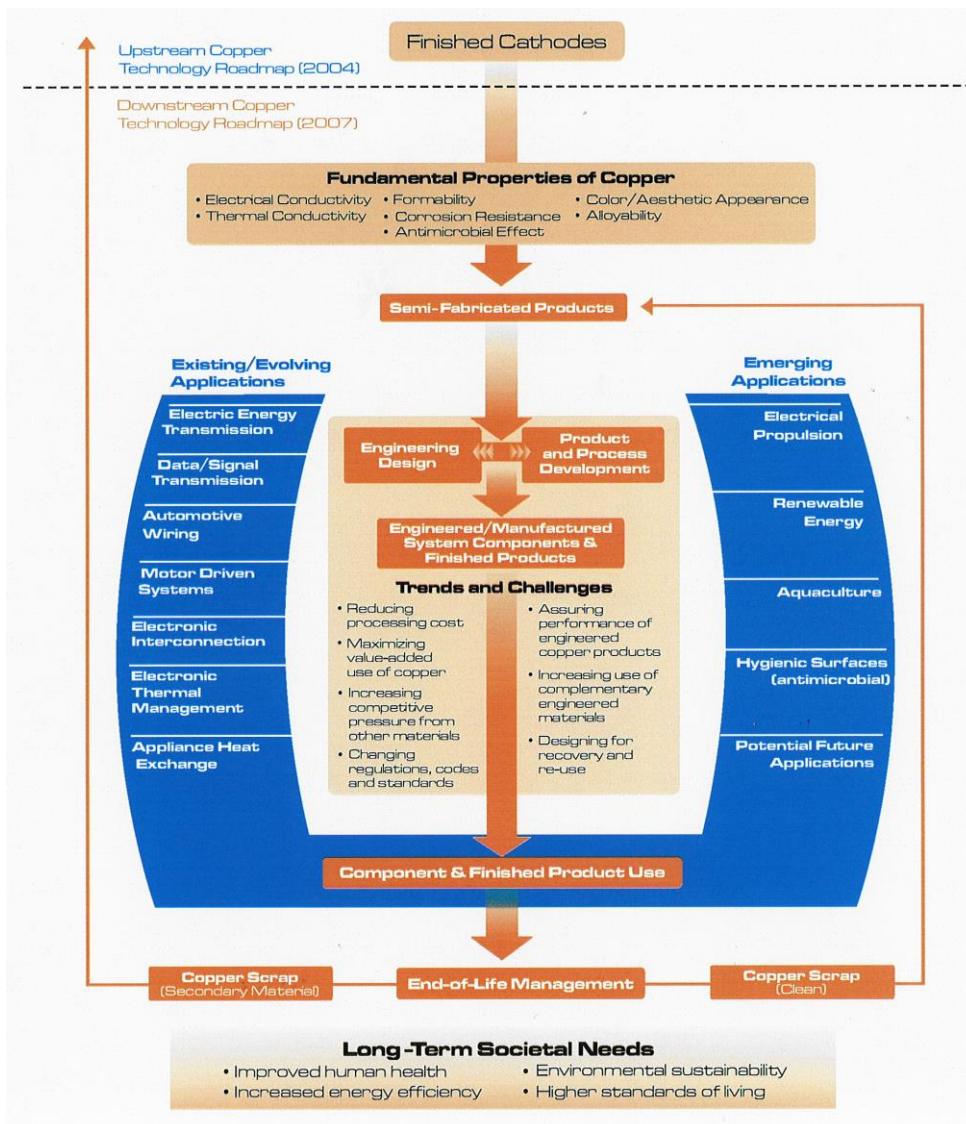
l'exploration et l'inventaire des ressources ; l'extraction minière ; le traitement des minerais ; la métallurgie, la production de métaux ; le recyclage.

Une des vocations premières des plateformes technologiques européennes est l'élaboration de feuilles de route, sous forme « d'agendas stratégiques », qui identifient et priorisent les principaux défis auxquels sont confrontés les filières et secteurs représentés par la plateforme. Ce type d'exercice n'est bien entendu pas spécifique au cadre européen.

Il faut toutefois noter qu'à ce jour, les exemples de feuilles de route les plus abouties émanent plutôt d'Amérique du Nord, où ce type d'exercice est mené de plus longue date. Ainsi, l'industrie du cuivre a élaboré sa propre feuille de route technologique dans le cadre de l'ICA (International Copper Association, cf. illustration page suivante), publiée en 2007, et mise à jour en 2012. Celle-ci identifie aussi bien les applications existantes, avec une logique d'innovation incrémentale, que les applications émergentes.

Dans le cadre de l'Europe et de H2020 en particulier, l'association SPIRE (*Sustainable Process Industry through Resource and energy Efficiency*), qui regroupe certains acteurs de la chaîne de valeur de l'aluminium, a émis une feuille de route stratégique des « industries de procédé », qui sur de nombreux points est pertinente pour l'aluminium, et ainsi que pour d'autres métaux non ferreux. Outre l'association SPIRE, il faut aussi mentionner l'EFFRA (*European Factory of the Future Research Association*), qui a édité une feuille de route globale européenne pour les industries manufacturières, et qui donc concerne plus ou moins directement l'ensemble de l'industrie des métaux non ferreux.

Figure 1 : Exemple de feuille de route technologique de l'industrie du cuivre



Source : International Copper Association, 2007

3. ÉTUDES DE CAS

L'analyse globale de la position française, telle que présentée dans le chapitre suivant, est ici précédée d'une série d'études de cas, illustrant les différents enjeux en matière de recherche et d'innovation.

Le choix s'est porté sur une demi-douzaine d'exemples, répartis à parts égales entre sujets « procédés » et « applications ». Cette liste a été constituée suite à la consultation des membres du Comité de pilotage de la mission, ayant permis d'aboutir à un consensus sur le choix des sujets. Ces différents sujets sont déjà présents, à des degrés divers, dans plusieurs documents d'orientation nationaux : *Technologies-Clés 2015* ; *La Nouvelle France Industrielle – 34 Plans* ; *Commission Innovation 2030*. Le tableau suivant (limité aux six études de cas détaillées dans les paragraphes qui suivent) en donne une vue d'ensemble.

Etude de cas	T.-Clés 2015	34 Plans	Innovation 2030
<i>Procédés</i>			
Hydrométallurgie	<i>Technologies pour le traitement des ressources minérales</i>		
Métallurgie des poudres	<i>Fabrication rapide</i>	<i>Usine du futur</i>	
Recyclage	<i>Technologies pour le recyclage des matériaux rares</i>	<i>Recyclage et matériaux verts</i>	<i>Recyclage des matières</i>
<i>Applications</i>			
Stockage électrochimique de l'énergie	<i>Stockage stationnaire de l'électricité</i> <i>Technologies de stockage à bord de l'énergie électrique</i> <i>Nanomatériaux</i>	<i>Autonomie et puissance des batteries</i>	<i>Stockage de l'énergie</i>
Alliages hautes performances	<i>Matériaux de performance</i> <i>Nouvelles technologies de turbomachines</i> <i>Energie nucléaire</i>	<i>Nouvelle génération d'aéronefs</i>	
Conducteurs pour les câbles électriques	<i>Réseaux électriques intelligents</i> <i>Nanomatériaux</i>		

3.1. Hydrométallurgie

3.1.1. Principe du procédé, variantes

Les procédés hydrométallurgiques sont des procédés d'extraction des métaux qui comportent une étape où le métal est solubilisé. Ils sont principalement utilisés lorsqu'un minerai ou un concentré contient plusieurs métaux ; ils permettent la séparation et donc la valorisation de ces différents métaux. L'hydrométallurgie est apparue au niveau industriel au XVIII^e siècle pour le cuivre, à la fin du XIX^e pour l'or et au début du XX^e pour le zinc.

Généralement, les procédés hydrométallurgiques sont composés de trois étapes clés :

- la lixiviation : mise en solution des différents métaux,
- la purification : séparation des différents métaux contenus dans la solution récupérée à l'issue de la lixiviation,
- l'élaboration des métaux recherchés : récupération du métal souhaité sous forme métallique.

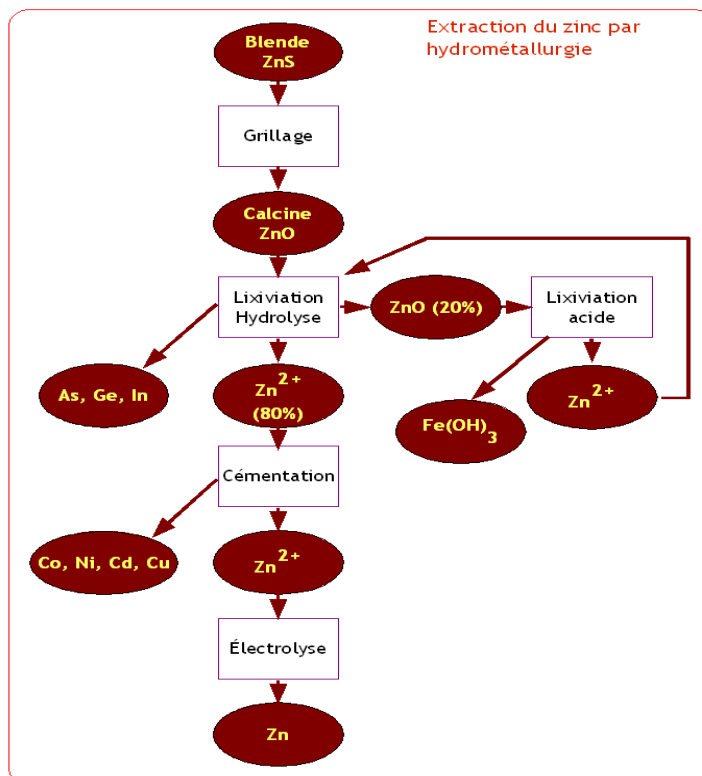
La lixiviation est réalisée par ajout d'un acide ou d'une base et généralement d'un oxydant. Une variante possible est la réalisation d'une biolixiviation (abordée de façon plus détaillée dans la seconde partie de ce chapitre) impliquant l'utilisation de micro organismes. Les enjeux de la lixiviation sont de réussir à trouver une composition du lixiviat optimale pour solubiliser principalement les métaux qui sont souhaités. Une purification est souvent nécessaire car la lixiviation est rarement totalement sélective. Pour cette étape, différents procédés peuvent être utilisés tels que la cémentation (réduction des cations métalliques par un autre métal), l'adsorption sur des résines échangeuses d'ions ou de la séparation électrolytique (réduction des ions métalliques).

L'étape d'élaboration du métal est réalisée grâce à différentes techniques telles que la cémentation, la précipitation ou l'électrodéposition. La technique employée sera conditionnée par des aspects économiques mais également par l'état final du composé. Par exemple, l'électrodéposition est privilégiée pour l'obtention d'un métal massif alors que la précipitation est mise en œuvre pour l'obtention d'un sel métallique.

Si besoin, la lixiviation peut être précédée d'une étape de prétraitement (pour concentrer le métal ou rendre la matière première lixiviable) et l'étape d'élaboration du métal peut être suivie d'une étape de raffinage.

Un exemple d'une succession d'étapes d'un procédé d'hydrométallurgie pour l'obtention du zinc est présenté ci-après.

Figure 2 : Schéma représentant les étapes successives de l'extraction du zinc par hydroméallurgie



Source : article hydroméallurgie, Wikipedia

3.1.2. Procédés concurrents

Les principaux procédés concurrents sont les procédés de pyroméallurgie. Cette technique est le procédé historique, elle permet de récupérer les métaux par voie thermique. Les principales étapes de ce procédé sont les suivantes :

- grillage : traitement thermique permettant d'homogénéiser la source de métal et d'oxyder le métal lorsque celui-ci se trouve sous forme de minerai sulfuré,
- réduction du métal : étape clé de l'extraction où le métal passe par un état liquide voire gazeux,
- affinage : étape permettant la purification du métal.

3.1.3. Périmètre : métaux concernés

Les principaux composés pour lesquels l'hydroméallurgie représente plus de 50 % de la production sont l'alumine, le cobalt, le zinc et le nickel. Le cobalt est extrait par hydroméallurgie car il est un co-produit de l'extraction d'autres métaux (majoritairement du nickel et également du cuivre).

Au-delà de ces métaux et oxydes, l'hydroméallurgie concerne la production de cuivre, lithium, magnésium, molybdène et des métaux précieux (or, argent, platinoïdes).

3.1.4. Ressources transformées

Les procédés hydrométallurgiques permettent de transformer des minerais non conventionnels c'est-à-dire contenant de nombreuses impuretés, des teneurs plus faibles en métaux ou composés d'intérêt ou une grande variété de métaux d'intérêt et pour lesquels des procédés pyrométallurgiques seraient trop coûteux.

En priorité, les procédés d'hydrométallurgie sont donc principalement développés pour les métaux dont la ressource minière disponible a évolué par rapport aux décennies précédentes, du fait que les gisements « faciles » à exploiter sont de moins en moins nombreux.

Ces procédés sont également utilisés pour le recyclage de certains métaux (voir §3.3).

3.1.5. Avantages et principales raisons du développement de ce procédé

L'hydrométallurgie répond à deux enjeux importants de l'exploitation minière et de l'extraction des métaux non ferreux :

- la nécessité d'exploiter des minerais non conventionnels (au sens de la définition donnée au paragraphe précédent),
- dans certains cas, la réduction de la consommation énergétique des procédés d'extraction.

En effet, pour couvrir la demande croissante en métaux non ferreux, il est nécessaire d'exploiter de nouveaux types de gisement pour lesquels la pyrométallurgie est peu adaptée.

La Figure 3 illustre la différence entre le type de minerais traité par pyrométallurgie et par hydrométallurgie avec l'exemple du nickel. La saprolite et la limonite sont des minerais contenant du nickel et constituant tous deux des formes de latérite. La latérite est une roche rouge ou brune, qui se forme par altération des roches sous les climats tropicaux. Le sens large désigne l'ensemble des matériaux, meubles ou indurés, riches en hydroxydes de fer ou en hydroxyde d'aluminium. En comparaison à la saprolite, la limonite est un minerai de type « non conventionnel » pour le nickel car la concentration en oxyde de fer y est beaucoup plus importante et la concentration en chrome est plus élevée que celle du nickel. Pour cette raison, la saprolite est traitée par pyrométallurgie alors que la limonite est traitée par hydrométallurgie.

Figure 3 : Composition minérale de deux roches contenant du nickel

Source : CEA

Process	Pyro-	Hydro-
Major elements (%)	Saprolite (rich)	Limonite
SiO ₂	40-60	10-20
Al ₂ O ₃	0,5-5	0,5-5
Fe ₂ O ₃	10-20	40-70
MgO	10-30	<0,5
Minor elements (ppm)		
Co	733	1150
Cr (%)	1-1,5	2-5
Cu	3000	1990
Ni (%)	2-3	1-1,8
Zn	323	403

Les procédés hydrométallurgiques en eux-mêmes sont des procédés plus économes en énergie que les procédés pyrométallurgiques car les températures de réaction mises en jeu sont inférieures à 100°C alors que pour la pyrométallurgie, elles sont de l'ordre de 1200 °C. Cependant, pour une comparaison plus pertinente de l'impact global de ces deux procédés sur l'environnement, la comparaison des deux bilans ACV (Analyse du Cycle de Vie) complets doit être effectuée. Notamment, le fait que les procédés d'hydrométallurgie fassent appel à des réactifs chimiques impacte négativement le bilan carbone de ces procédés. En revanche, un autre impact positif sur l'ACV des procédés d'hydrométallurgie provient de la possibilité de valoriser de nombreux métaux d'un minerai. En effet, l'étape du cycle de vie qui a la plus forte empreinte carbone est souvent la mine ; récupérer davantage de métaux d'un même minerai permet donc de limiter l'extraction minière et ainsi de réduire l'empreinte carbone de l'extraction. Dans le cas particulier de l'aluminium, la plus grande part de l'empreinte ACV Carbone est l'électrolyse. Dans ce cas, le choix du procédé hydrométallurgique (par opposition au procédé pyrométallurgique) ne s'est pas fait sur ces considérations, mais pour des raisons pratiques de fonctionnement à des températures techniquement raisonnables.

Le choix du procédé qui aura le plus faible impact environnemental doit être fait au cas par cas : l'un ou l'autre des procédés pourra avoir le meilleur bilan carbone.

3.1.6. Gestion des déchets de l'hydrométallurgie

Par le passé, les déchets des procédés d'hydrométallurgie ont été la cause d'accidents ayant eu des conséquences négatives sur l'environnement. On notera par exemple le déversement de boues rouges dans le Danube suite à une fuite d'un stockage d'une usine située en Hongrie en 2010.

Aujourd'hui, on constate que la gestion des déchets de l'hydrométallurgie fait l'objet de recherches et que des solutions ont été trouvées pour éviter qu'un tel accident se reproduise. L'objet de ces recherches est de faire en sorte que les déchets ne puissent pas s'infiltrer dans le sol ni se déverser en étant la cause d'une coulée de boue. Pour cela, les déchets sont transformés sous forme solide (alors qu'ils étaient entreposés sous forme de boues auparavant) grâce à l'ajout d'étapes supplémentaires de filtration et de précipitation à la fin des procédés d'hydrométallurgie. Les poudres obtenues doivent être chimiquement et mécaniquement stables. De cette manière, il n'y a pas de risque d'infiltration dans les sols et les poudres peuvent, lorsqu'elles sont disposées sous forme de larges tas, constituer un terrain stable. De plus, maintenant que la stabilité du terrain de déchets est un savoir-faire acquis, la recherche se penche vers l'ajout d'une nouvelle propriété : la possibilité que ces poudres puissent être revégétalisées.

3.1.7. Volumes concernés, tendances d'évolution

Les principaux composés pour lesquels l'hydrométallurgie représente une très grande part de la production sont l'alumine (100 %), le cobalt (100 %) et le zinc (90 %).

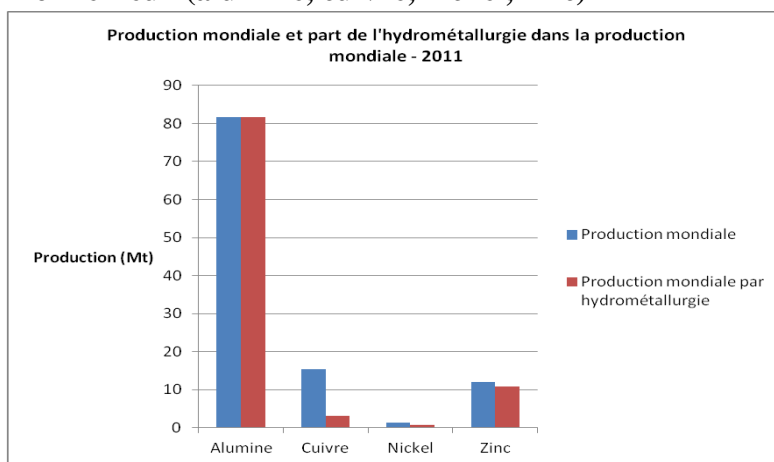
L'alumine est produite à 100 % par voie hydrométallurgique puis l'aluminium est produit à partir d'alumine par électrolyse. Presque 100 % du cobalt est produit par hydrométallurgie car il est un co-produit d'autres métaux (nickel et cuivre) dont les minerais sont exploités par hydrométallurgie.

De plus, l'hydrométallurgie concerne la production de nickel (55 %), cuivre (20 %), lithium (15-20 %), magnésium (<20 %), molybdène (<10 %) et de métaux précieux (or, argent, platinoïdes).

Les minerais de cuivre et de nickel exploités par la voie hydrométallurgique sont les oxydes, les minerais sulfurés étant exploités par pyrométallurgie. La part de l’hydrométallurgie dans la production de ces deux métaux sera croissante dans les prochaines années. Cela est dû au développement de procédés hydrométallurgiques pour traiter les minerais sulfurés. Pour le lithium, 80-85 % est extrait à partir de saumures, voie pour laquelle une substitution par hydrométallurgie n’est pas envisageable. C’est le lithium sous forme de minerais qui est exploité par des procédés hydrométallurgiques.

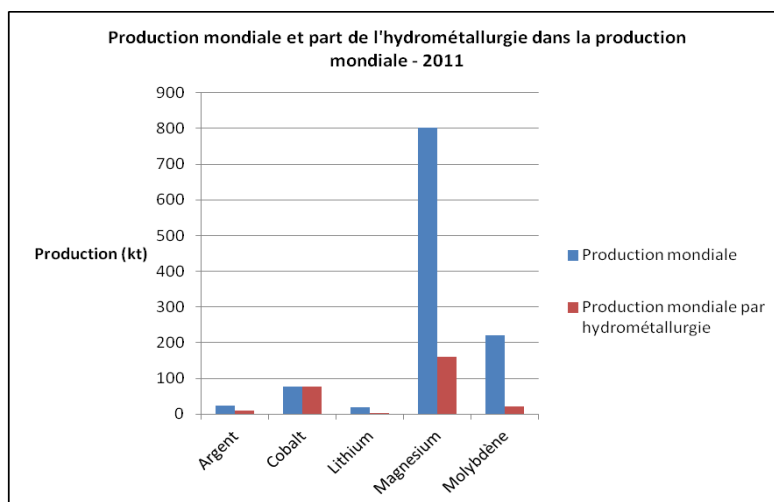
La production totale de différents métaux et la production par hydrométallurgie pour ces métaux sont représentées sur les graphiques suivants (séparés en deux graphiques pour des raisons d’échelle).

Graphique 1 : Production mondiale et part de l’hydrométallurgie dans la production de différents métaux non ferreux (alumine, cuivre, nickel, zinc)



Source : Erdyn, compilation de plusieurs sources (USGS, rapports d’entreprises, etc.)

Graphique 2 : Production mondiale et part de l’hydrométallurgie dans la production de différents métaux non ferreux (argent, cobalt, lithium, magnésium, molybdène)



Source : Erdyn, compilation de plusieurs sources (USGS, rapports d’entreprises, etc.)

3.1.8. Verrous

Les procédés d'hydrométallurgie ne sont pas confrontés à des verrous technologiques majeurs : en effet, les différentes étapes unitaires sont bien maîtrisées actuellement. En revanche, à chaque nouveau type de minerai, que ce soit en exploitation ou en recyclage, un nouveau procédé doit être développé, en cohérence avec les métaux que l'on souhaite valoriser. Chaque minerai étant différent, le développement du procédé de lixiviation associé nécessite de trouver la bonne composition du lixiviat qui tient compte des autres métaux et impuretés présents et qui permet d'obtenir les produits désirés. La potentielle toxicité du lixiviat et la façon de le recycler ou de le traiter avant de le rejeter sont des paramètres à également prendre en compte.

Les principaux verrous que l'on peut mentionner concernent la lixiviation et plus spécifiquement les étapes de prétraitement améliorant le rendement de la lixiviation. La dissolution de certains minerais (les minerais réfractaires par exemple) dans l'eau, pourtant nécessaire à la mise en œuvre de procédés d'hydrométallurgie ne peut pas se faire aux conditions de pression et de température ambiantes. Dans ces cas de figure, la lixiviation est réalisée sous pression en présence d'acide chaud. Néanmoins, ces procédés sont coûteux en énergie et nécessitent des mesures de sécurité supplémentaires.

3.1.9. Principaux acteurs développant ce type de procédés

Au **niveau mondial**, plusieurs centres de compétences sont à mentionner : MINTEK (Afrique du Sud), organisation nationale dédiée à la recherche minière, active également en matière de métallurgie extractive ; l'ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation, Australie), qui développe des procédés hydrométallurgiques pour l'extraction de terres rares et d'uranium ; le CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australie), qui développe des procédés hydrométallurgiques pour l'extraction de métaux de base et de métaux précieux. Quelques sociétés d'ingénierie maîtrisant ce type de procédés, telles que Bateman, Fluor, Hatch ou SNC Lavalin, sont impliquées dans plusieurs projets de sites de production dans le monde.

Au **niveau européen** :

- Quelques grands groupes possèdent en interne leurs propres compétences en matière de d'hydrométallurgie ; on peut citer plus particulièrement le français ERAMET, à travers sa filiale ERAMET Research, ainsi que le groupe Umicore.
- L'industrie métallurgique peut par ailleurs s'appuyer sur plusieurs ingénieristes, en particulier MEAB (Suède), Outotec (Finlande) et Tecnicas Reunidas (Espagne), auxquels on peut ajouter le français Technip, présent dans des projets pour le nickel (Nouvelle-Calédonie et Indonésie).
- Côté académique, on peut citer la RWTH en Allemagne, l'université Luleå en Suède, ainsi que l'INM (Institute of Non Ferrous Metals) en Pologne, dont un département est dédié à l'hydrométallurgie.

En France, le CEA possède des compétences en hydrométallurgie au travers de l'extraction d'uranium par ce procédé est utilisée. Le CEA et ERAMET sont par ailleurs porteurs du projet d'Institut Européen de l'Hydrométallurgie (IEH), qui aura pour but de fournir aux industriels souhaitant développer des procédés hydrométallurgiques une plateforme de pilotes industriels.

3.1.10. Perspectives

Les enjeux liés à l'hydrométallurgie se déclinent de deux façons :

Un premier enjeu est de rester compétitif dans la production de métaux primaires reposant sur ce type de procédé, mis en oeuvre en France métropolitaine principalement sur les sites d'ERAMET à Sandouville et de Nyrstar à Auby. La maîtrise de cette technologie doit être maintenue à un niveau suffisamment élevé pour faire face aux défis actuels, en particulier la nécessité d'être en capacité de traiter des minerais plus complexes, moins riches en métaux. Les perspectives sont doubles : disposer des compétences permettant de se positionner sur les projets internationaux ; être en position de répondre aux besoins susceptibles d'émerger suite à la relance de l'exploration minière sur le territoire national – cette perspective s'inscrivant toutefois dans le long terme.

Le second enjeu concerne les opportunités liées aux déchets (déchets de biens de consommation et déchets miniers, en particulier). Le cas échéant, ces opportunités peuvent se concrétiser par la création d'activités nouvelles ; les cas de Solvay-Rhodia, avec le recyclage de terres rares issues de lampes basse consommation (l'étape hydrométallurgique étant effectuée à La Rochelle), ou bien d'Eurodieuze, dont les activités sont centrées sur le recyclage par voie hydrométallurgique des batteries nickel-cadmium, nickel-métal-hydrure et lithium-ion, en sont l'illustration. De façon plus générale, il est à noter l'intérêt potentiel de l'hydrométallurgie dans la « détoxification » de déchets dangereux. Ce type de procédé est aujourd'hui par exemple utilisé à échelle industrielle au Canada pour neutraliser les cathodes usagées de cuves d'électrolyse de l'aluminium, et d'en extraire des matériaux valorisables.

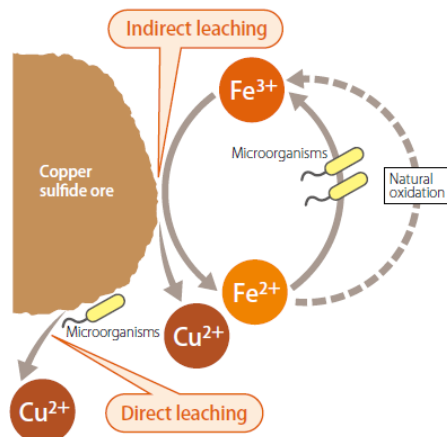
Les principaux détenteurs de compétences en hydrométallurgie sont les grands groupes miniers et métallurgiques (ex. : Xstrata), ainsi qu'un nombre restreint d'ingénieristes/fournisseurs de procédés dont le périmètre d'activité est international (Bateman, Fluor, Hatch, etc.), parfois issus des grands groupes (exemple d'Outotec). Au niveau européen, on constate globalement un déficit de moyens d'expérimentation. Il existe des équipements au stade laboratoire – l'université RWTH, en Allemagne, dispose par exemple d'un ensemble de moyens dédiés à l'hydrométallurgie, mais de capacité limitée (en moyenne une dizaine de l/h) –, mais il subsiste un chaînon manquant avant le passage à la démonstration à l'échelle semi-industrielle. L'enjeu est de se positionner par rapport aux moyens disponibles dans les « grands » pays miniers (Canada, Australie, Afrique du Sud), en envisageant tout projet dans une perspective européenne, en association avec les principaux industriels concernés : ERAMET, Umicore, Aurubis, Boliden, KGHM, etc.

Focus sur la biolixiviation

3.1.11. Principe du procédé, variantes

La biolixiviation, qui peut s'inscrire au sein d'un procédé d'hydrométallurgie au même titre que la lixiviation, consiste en la mise en solution de métaux d'intérêt par un procédé en milieu acide impliquant des micro-organismes.

La biolixiviation peut agir de manière directe, en agissant sur le minerai pour mettre en solution les ions métalliques désirés ou de manière indirecte, en oxydant d'abord un autre ion métallique qui viendra ensuite réagir avec le minerai afin d'oxyder le métal d'intérêt. Ces différents modes d'action sont illustrés dans la figure ci-dessous.

Figure 4 : Schéma descriptif des mécanismes de biolixiviation

Source : JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)

Plusieurs procédés de mise en œuvre de la biolixiviation existent. Les procédés statiques (également appelés « procédés en tas ») mettent en œuvre le passage d'une solution acide contenant des micro-organismes à travers un minerai issu directement d'une mine. Ces procédés sont surtout utilisés pour l'extraction du zinc, du cuivre, du nickel, du cobalt et de l'or. Pour les procédés dynamiques, le minerai préalablement broyé et mélangé à la solution bactérienne est mis sous agitation dans un réacteur afin de faciliter les échanges gaz/liquide/solide.

3.1.12. Procédés concurrents

Les procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques sont concurrents des procédés biohydrométallurgiques.

3.1.13. Périmètre : métaux concernés

La maîtrise de cette catalyse biologique a permis de concevoir des procédés industriels d'extraction de métaux comme le cuivre, le zinc, le cobalt et le nickel. Les principaux minerais concernés par cette technologie sont les minerais sulfurés, qui sont également souvent riches en fer. Le soufre et le fer sont les principaux minéraux dont les changements d'état d'oxydation sont utiles à la croissance des micro-organismes. L'or peut aussi être extrait par des procédés de biohydrométallurgie lorsqu'il se trouve dans des minerais très pollués par d'autres composés (or réfractaire).

3.1.14. Ressources transformées

La biolixiviation est avantageuse pour les minerais ayant des concentrations en métaux d'intérêt très faibles. Cela offre donc la possibilité de pouvoir traiter de nouveaux minerais. Par ailleurs, les minerais sulfurés se prêtent bien aux procédés biohydrométallurgiques car il existe des micro-organismes capables de se développer dans des milieux sulfurés, les bactéries sulfato-réductrices.

3.1.15. Avantages et principales raisons du développement de ce procédé

Les faibles concentrations en métaux ne sont pas un frein pour la biolixiviation car les bactéries interagissent uniquement avec le métal que l'on cherche à extraire, ce qui permet d'obtenir une très bonne sélectivité.

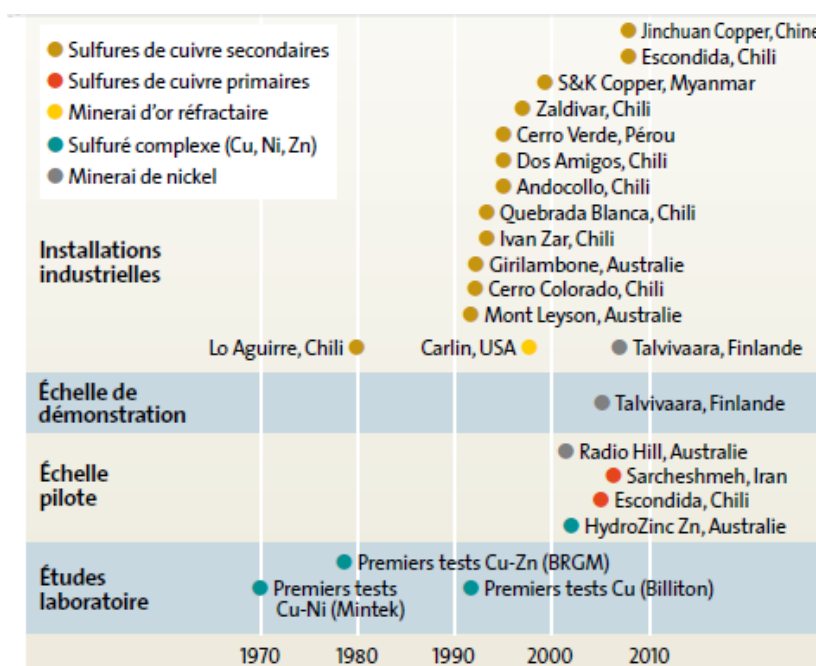
Le principal frein restant actuellement provient du fait que la biolixiviation engendre des volumes à traiter plus importants que pour l'hydrométallurgie classique. La réduction de la taille des installations proviendra principalement de l'augmentation des vitesses de réaction, qui restent aujourd'hui relativement faibles.

Les procédés statiques permettent une extraction de gisements peu riches en métaux d'intérêt, pour un coût relativement faible, mais le temps de réaction est lent. Les procédés dynamiques font intervenir des installations plus petites, sont plus rapides, mais sont aussi plus coûteux. Chaque technique comporte ses propres avantages et inconvénients, qui seront évalués selon la localisation du gisement, l'environnement en périphérie et la teneur en métaux des minerais.

3.1.16. Volumes concernés, tendances d'évolution

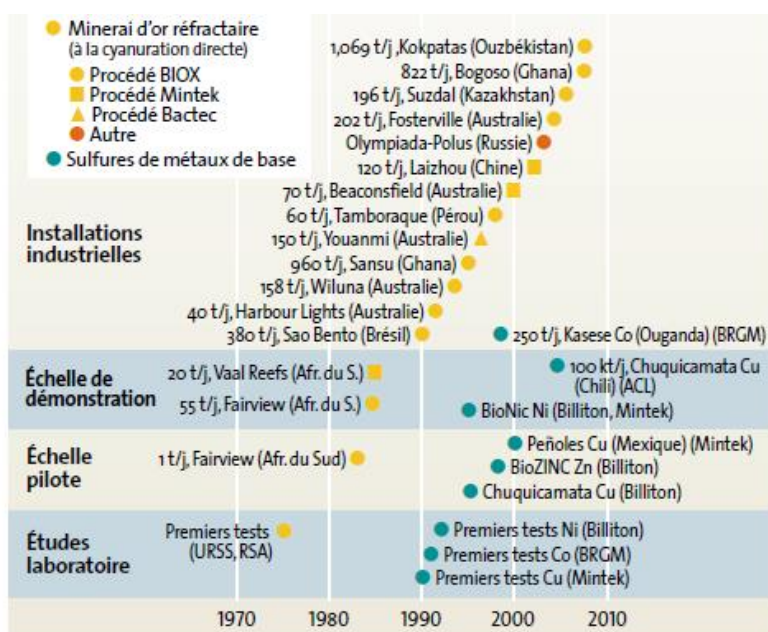
Comme le montrent les graphiques suivants, les installations d'extraction par biolixiviation de cuivre secondaire et d'or sont industrialisées depuis le début des années 1990 et se développent encore aujourd'hui. Pour les autres types de minerais (cuivre primaire, zinc, cobalt, nickel) la biolixiviation dynamique est le principal procédé en cours de développement et une phase d'industrialisation semble se profiler pour les années à venir.

Figure 5 : Liste (non exhaustive) des installations de biolixiviation en tas dans le monde.



Source : La biolixiviation des minerais sulfurés, Géosciences, juillet 2010

Figure 6 : Liste (non exhaustive) des installations de biolixiviation dynamique dans le monde.



Source : La biolixiviation des minerais sulfurés, Géosciences, juillet 2010

3.1.17. Verrous

Actuellement les procédés en tas sont encore relativement lents, ce qui ne permet pas toujours d'assurer une rentabilité suffisante. Inversement, les procédés dynamiques ont des coûts importants ce qui les rend parfois peu compétitifs.

3.1.18. Principaux acteurs développant ce type de procédés

Parmi les acteurs industriels, on peut citer Comet Traitements (Belgique), Vale (Canada), BHP Billiton (Australie), Codelco (Chili), Phelps Dodge (États-Unis) et Nippon Mining & Metals (Japon).

S'agissant des acteurs de la recherche, on peut citer JOGMEC (Japon), l'Université de Liège (Belgique), l'Université de Sao Paulo (Brésil), le BRGM (France), le CEA (France) et MINTEK (Afrique du Sud).

En France, le BRGM est particulièrement actif dans le domaine, comme le montre son implication dans le développement d'installations de biolixiviation à partir des années 80 (voir Figures 5 & 6). Plus récemment, le BRGM est co-leader dans un projet ANR (appel à projets de 2013) en partenariat avec l'Allemagne. Ce projet s'intitule « Procédés bio-hydrométallurgiques innovants et éco-efficaces pour la récupération des métaux stratégiques et rares : ressources primaires et secondaires ».

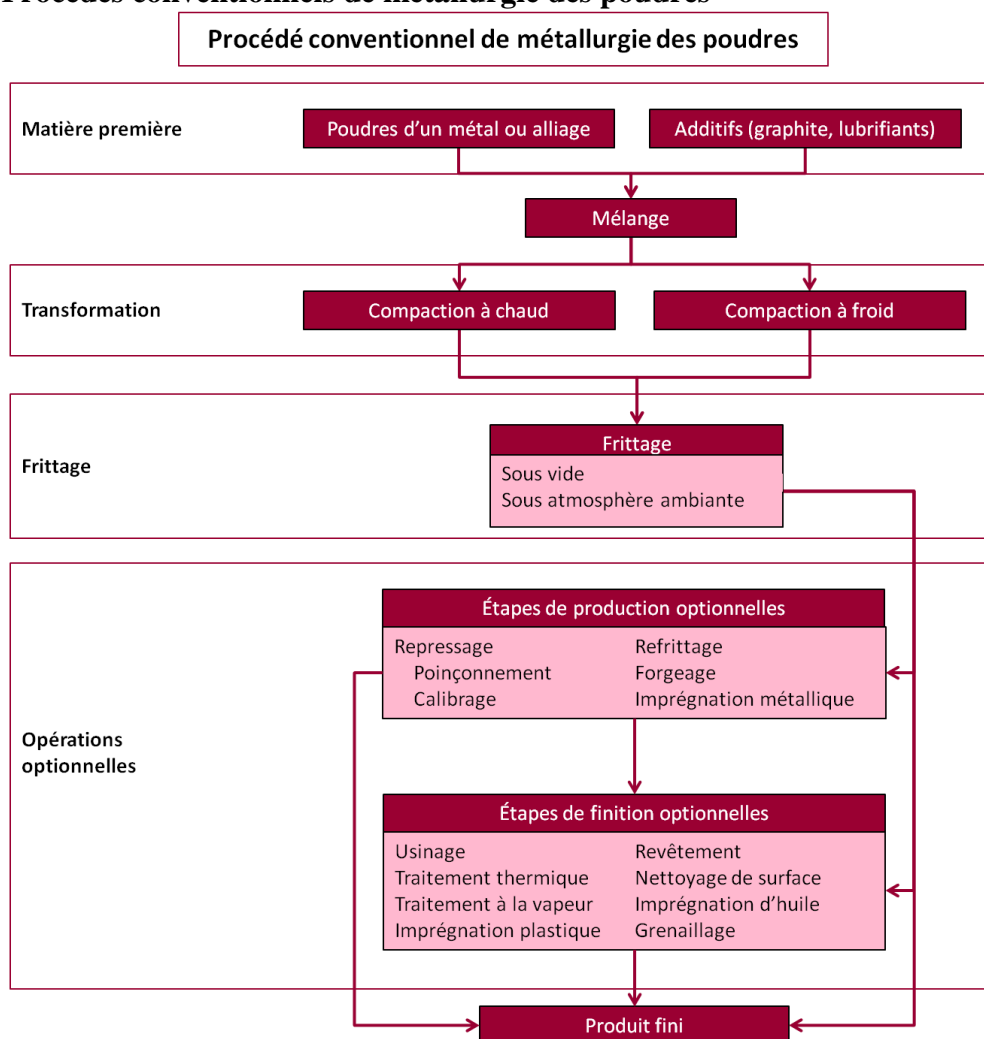
3.2. Métallurgie des poudres

L'expression « métallurgie des poudres » recouvre plusieurs procédés d'élaboration de pièces à partir de poudres métalliques. Les premiers procédés ont été industrialisés il y a une centaine d'années. Cette étude de cas présente principalement les procédés développés depuis une dizaine d'années ainsi que les technologies sur lesquelles des avancées sont attendues pour les années à venir.

3.2.1. Principe des procédés, variantes

La métallurgie des poudres (MP) recouvre un ensemble de procédés utilisés pour produire des composants « au plus près des cotes », c'est-à-dire des composants qui nécessitent un minimum d'usinage après fabrication. Ces composés sont élaborés en mélangeant des poudres métalliques (métal élémentaire ou allié) et en formant ce mélange dans des moules ou des matrices (« die » en anglais). Les pièces qui sont issues du formage sont manipulables mais friables, d'où la nécessité de réaliser une opération de frittage afin de donner aux pièces leur forme définitive. Le frittage est réalisé dans un four sous atmosphère contrôlée pour lier les particules entre elles.

Figure 7 : Procédés conventionnels de métallurgie des poudres



Source : Metal Powder Industries Federation, PM Industry roadmap 2012, traduction Erdyn

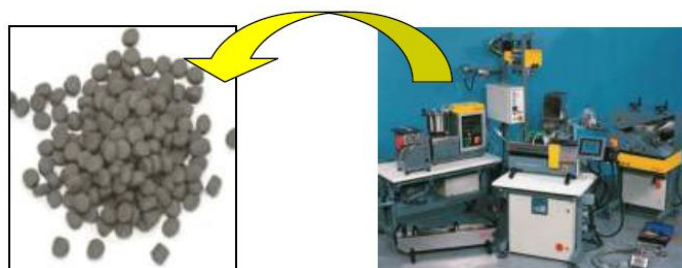
Les procédés de métallurgie des poudres qui se sont développés le plus récemment sont les suivants :

- procédés permettant d'obtenir des pièces de haute densité (« high density processing ») : ces procédés se sont développés grâce à l'amélioration des outils, qui ont permis le développement de la compression de pièces de plus gros tonnage, de la compression à chaud et de la lubrification électrostatique des parois des pièces ;
- concernant les matériaux, le développement de lubrifiants plus performants, d'alliages à plus bas coût et de poudres durcies par frittage (« sinter-hardening powders ») a permis l'augmentation de la densité des pièces obtenues et l'élargissement des applications ;
- des procédés comme le MIM (Metal Injection Molding – moulage par injection de métal) et l'impression 3D ont également fait leur apparition. Ils doivent encore être améliorés à l'échelle industrielle : c'est la raison pour laquelle ce chapitre leur est principalement consacré.

Description du procédé MIM

La première étape d'un procédé MIM consiste à mélanger la poudre métallique avec différents composants du liant dans un malaxeur. La poudre possède une granulométrie de 2 à 20 μm et le liant est souvent un polymère auquel sont ajoutés différents adjuvants (agents mouillants, réactifs, etc. Le mélange final, appelé « feedstock », contient environ 50 à 70 % de poudres métalliques en volume. Il est mis sous forme de granulés par broyage.

Figure 8 : Feedstock avec poudre métallique (gauche) et compoundeur* pour feedstock (droite)



Source : Guide des bonnes pratiques. Technologie PIM, CRITT MDTS, Sirris

* : un compounder mélange des matières premières. Ici la poudre métallique et le liant

La mise en forme des pièces se fait ensuite sur des presses à injecter du même type que celles de la plasturgie.

Une étape de déliantage, c'est-à-dire l'élimination du liant, est ensuite réalisée suivant deux types de procédés : la voie chimique ou la voie thermique. La nature des opérations de déliantage dépend du liant utilisé. Le traitement d'une pièce peut nécessiter de quelques heures à plusieurs jours suivant sa complexité, son épaisseur et la nature chimique du liant. Après le déliantage, la pièce n'a plus de tenue mécanique, elle est à manipuler avec précaution.

La pièce subit enfin une étape de frittage dans un four sous atmosphère inerte (azote, argon) ou réductrice (hydrogène). Les temps de traitement dépendent de l'épaisseur de la pièce et peuvent

durer jusqu'à 24h. Des pièces d'une densité de 95 à 99 % de celle du matériau massif sont ainsi obtenues.

Les pièces finies en MIM présentent un état de surface lisse. Toutefois, selon les applications envisagées ou dans le but d'optimiser leurs propriétés mécaniques, physiques, chimiques et géométriques, des traitements de finition (polissage, grenailage, durcissement, etc.) peuvent leur être appliqués.

Description de l'impression 3D

L'impression 3D est une technique de fabrication additive développée pour réaliser du prototypage rapide. Actuellement, elle permet difficilement de réaliser des pièces à usage intensif. Cependant, des pièces finies sont fabriquées pour le dentaire et la bijouterie.

L'impression 3D consiste en la réalisation en trois dimensions d'un modèle conçu par ordinateur. Pour cela, une tête d'impression est équipée d'un laser ou d'un faisceau d'électrons qui chauffe et agglomère des couches de grains de poudre les uns aux autres.

À terme, l'usage qui pourra être fait de l'impression 3D dans l'industrie reste incertain mais cela pourrait aller plus systématiquement au-delà du prototypage, vers les petites et moyennes séries. Par exemple, débuté en janvier 2013, le projet européen AMAZE (Additive Manufacturing Aiming Towards Zero Waste – Fabrication additive visant le zéro déchet) de l'Agence Spatiale Européenne vise à permettre, de manière industrielle, l'impression en 3D de pièces métalliques exploitables dans le spatial et d'autres domaines à fortes contraintes comme le nucléaire.

3.2.2. Procédés concurrents

Les procédés concurrents de la métallurgie des poudres sont les procédés classiques de mise en forme en métallurgie tels que le forgeage, la fonderie ou les procédés de compaction conventionnels.

3.2.3. Périmètre : métaux concernés

Tous les types de métaux peuvent en principe être mis en forme par métallurgie des poudres. Suivant les différents métaux, certains avantages sont particulièrement ciblés. Les procédés de métallurgie des poudres, qui font intervenir des températures inférieures aux températures de fusion des métaux, sont notamment intéressants pour les métaux réfractaires, qui ont des températures de fusion très élevées et dont la mise en forme par d'autres procédés n'est pas rentable car trop coûteuse en énergie.

Pour le MIM, l'aluminium est une exception notoire. En effet, il ne peut pas être utilisé car un oxyde est toujours présent en surface et celui-ci inhibe le frittage.

Pour l'impression 3D, l'aluminium, le titane, le nickel, le cobalt, le cuivre mais aussi leurs alliages, ainsi que les métaux précieux sont notamment compatibles.

Une des familles de métaux qui pourrait bénéficier le plus de ces techniques « au plus près de cotes » sont les métaux précieux car il n'y a presque pas de déchets lors de la production, ce qui permet de compenser le coût élevé de la poudre. De plus, lorsque des déchets sont produits, ils sont

récupérés pour être réutilisés comme matière première (ce qui est également le cas avec les procédés plus conventionnels, tels que la fonderie ou la forge).

3.2.4. Ressources transformées

Les caractéristiques (taille et forme des grains, microstructure) des poudres utilisées sont d'une grande importance car elles déterminent le type de pièce que l'on peut produire et les applications que l'on peut viser. La forte réactivité des poudres métalliques impose d'utiliser des fours de frittage sous atmosphère inerte (argon, azote) ou sous atmosphère réductrice (hydrogène) afin d'éviter tout risque d'oxydation.

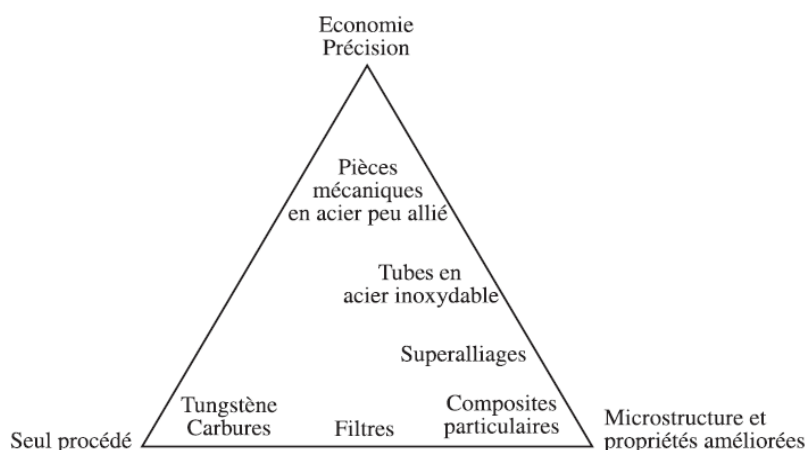
3.2.5. Avantages et principales raisons du développement de ces procédés

Les avantages de la métallurgie des poudres sur les techniques conventionnelles, dont le forgeage ou la fonderie, sont :

- la possibilité de produire des pièces de forme plus complexe et de taille plus réduite,
- la fabrication de pièces « au plus près des cotes », c'est-à-dire dont la forme est très proche de la forme définitive de la pièce et qui nécessite donc très peu d'opérations de finition,
- l'inscription dans une logique de développement durable grâce à la réduction de la consommation d'énergie et de matière (typiquement la pièce finale contient plus de 97 % des matières premières utilisées),
- le seul procédé économiquement rentable pour mettre en forme certains métaux réfractaires, qui ont une température de fusion très élevée, car recours à des températures inférieures,
- la possibilité de réaliser des pièces alvéolaires.

Pour certains types de matériaux, l'illustration ci-dessous montre des exemples de gains obtenus grâce à l'élaboration par la métallurgie des poudres.

Figure 9 : Nature des gains obtenus grâce à un procédé de métallurgie des poudres



Source : *Métallurgie des poudres*, Didier Bouvard

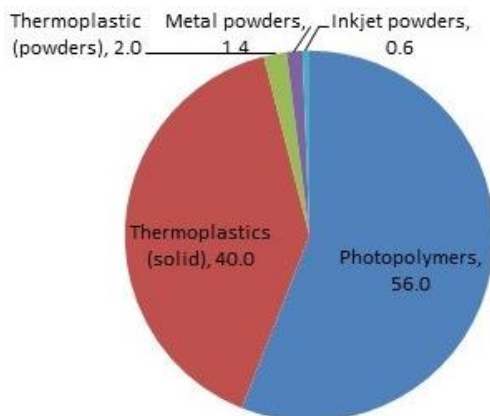
3.2.6. Volumes concernés, tendances d'évolution

Les pièces fabriquées par MIM sont principalement destinées au marché de l'automobile. Le marché mondial du MIM, qui représente en 2009, près de 990 millions de dollars (+ 23 % par rapport à 2007), devrait croître avec une vitesse annuelle moyenne de 14 % jusqu'en 2015. Dès aujourd'hui, l'Asie représente le plus grand marché et sa part ne fera que croître pour atteindre 51 % en 2014.

D'après l'EPMA (European Powder Metallurgy Association – Association européenne de la métallurgie des poudres), l'impact du volume sur les coûts est très significatif pour les plus petites pièces. Par exemple, pour une pièce pesant 4,5 g, produite par MIM, le coût de production unitaire passe de 1,4 \$ pour 250 000 pièces par an à 0,2 \$ pour 3 millions de pièces. En effet, dans cet exemple, multiplier les volumes par 12 revient à réduire les coûts unitaires de 85 %.

Le cabinet d'études IDTechEx, spécialisé dans les technologies émergentes, estime que le marché des matériaux utilisés dans le domaine de l'impression 3D devrait représenter un chiffre d'affaires de plus de 600 millions de dollars d'ici l'année 2025. Cependant, comme le montre le graphique ci-dessous, la part des poudres métalliques reste faible par rapport au reste des matériaux. En 2025, elle représenterait 1,4 % du marché total des matériaux pour impression 3D soit 8,4 M\$. Ce segment correspond donc à un marché de niche, mais qui est en croissance ; aujourd'hui, les poudres métalliques à destination du marché de l'impression 3D représentent moins de 30 tonnes/an.

Graphique 3 : Matériaux utilisés pour l'impression 3D (chiffres donnés en % de volume de production), prévisions 2025



Source : IDTechEx

3.2.7. Verrous

Une question transversale concerne les procédés de métallurgies des poudres : celle liée aux poudres en elles-mêmes. Actuellement, il existe une trop grande variabilité des poudres (granulométrie, distribution de la taille des particules) d'un lot à l'autre. Ce défaut vient principalement d'une difficulté à produire des poudres métalliques de façon précise. La taille et la forme des poudres influent notamment sur la densité finale de la pièce et sur l'efficacité du frittage. En ce sens, des particules sphériques et de très petites tailles donnent de meilleurs résultats. Ce sont

cependant des caractéristiques complexes à maîtriser et la production de telles poudres coûte cher aujourd'hui.

Verrous spécifiques du MIM

Le MIM a acquis aujourd'hui une certaine maturité mais certains points font toujours l'objet d'améliorations :

- mettre en place des moyens de maîtrise et de contrôle plus efficaces pour augmenter la reproductibilité des pièces,
- réduire les coûts pour gagner en compétitivité vis-à-vis d'autres procédés,
- développer des équipements de production en continu (le procédé se fait par lot aujourd'hui) : il y a notamment un besoin dans la conception de fours adaptés.

D'après le Guide des bonnes pratiques de la technologie PIM (Powder Injection Molding) rédigé par le CRITT MDTS et par Sirris (centre collectif de l'industrie technologique belge), les travaux européens actuels concernant le MIM portent principalement sur les projets suivants :

- intégration de la technologie pour l'aéronautique,
- développement des applications médicales,
- développement du microMIM (moulage de pièces de taille micrométrique),
- développement de la simulation du procédé pour mieux prédire la forme et la taille des pièces,
- travail de nouveaux matériaux comme le titane.

Verrous spécifiques de l'impression 3D

Les principaux verrous identifiés sont les suivants :

- prix des machines élevé,
- productivité des machines faibles,
- procédé rendant parfois involontairement les pièces poreuses du fait de l'injection de petites bulles d'air,
- attente de la validation des performances du procédé dans des secteurs clés comme l'aéronautique et le médical.

3.2.8. Principaux acteurs développant ce type de procédés

En France, le groupe ERAMET est un acteur majeur de la production de poudres métalliques. Ses filiales Eurotungstène et Aubert & Duval produisent des poudres destinées au frittage ; par ailleurs, à travers sa filiale Erasteel, le groupe est le premier producteur mondial de poudres atomisées au gaz (tous métaux, sauf le titane), utilisables en fabrication additive.

Un autre exemple de fournisseur de poudres est Poudmet, qui produit des poudres de cuivre et d'alliages non ferreux, destinées à la fabrication de pièces pour le secteur des transports.

Phenix Systems est le seul fournisseur français d'imprimantes 3D permettant de travailler des poudres métalliques.

Dans le domaine de l'impression 3D, on peut mentionner le suédois Arcam, avec des produits principalement à destination du marché des implants orthopédiques et de l'aéronautique.

Plusieurs acteurs académiques et centres de compétences sont à signaler : l'Université de Karlsruhe (Allemagne), le SIRRIS (Centre collectif de l'industrie technologique belge), l'Institut Fraunhofer IFAM (Allemagne), l'Université Mc Gill (Canada), l'Université de Tokyo (Japon), l'Université des sciences et techniques de Pékin (Chine), etc. En France, le CETIM, l'INP Grenoble, le CEA (site de Grenoble) ainsi que le CRITT MDTs (Ardennes) sont actifs dans ce domaine.

Ce dernier en a fait un de ses axes prioritaires, à travers le programme franco-wallon de promotion des procédés par injection de poudres (PristiPIM, 2008-2014) et la création fin 2013 d'un cluster dédié à l'impression 3D, en association avec le pôle Materialia et l'Université de Reims Champagne Ardenne, et regroupant une dizaine d'entreprises ardennaises. Un des objectifs de ce cluster est la mise en place d'une plateforme regroupant un ensemble de moyens techniques, permettant de mener des projets de démonstration à une échelle représentative du stade industriel, avec un besoin de financement évalué à plusieurs millions d'euros.

Côté académique, on remarque en particulier la mise en service en 2013 d'un équipement de fabrication additive assistée par faisceau d'électrons, implantée au sein de l'INP Grenoble, visant dans un premier temps les pièces en alliage de titane, et destinée à être mobilisée dans le cadre de projets industriels.

3.2.9. Perspectives

Du point de vue de la fabrication de pièces métalliques, les technologies considérées ici (injection de poudres, fabrication additive) s'adressent prioritairement à la production :

- en petites/moyennes séries ;
- de pièces complexes, non réalisables par les procédés conventionnels ;
- à partir de métaux à haute valeur ajoutée : alliages de titane, métaux précieux.

Les enjeux sont différents pour le MIM et la fabrication additive : le premier est une technologie globalement plus mature, la principale application concernant la fabrication de pièces mécaniques pour l'automobile, pour laquelle on constate un déplacement de la production vers l'Asie. S'agissant des perspectives en Europe, il y a toutefois une certaine convergence du point de vue des secteurs concernés prioritairement par ces technologies : aéronautique, médical, bijouterie.

Trois principaux types d'acteurs sont concernés :

- Tout d'abord, les fournisseurs de poudres. De ce point de vue, l'offre adaptée à fabrication additive est encore embryonnaire.
- Les concepteurs/fournisseurs d'équipements. S'agissant de la fabrication additive, le marché est en train de se structurer ; l'offre européenne est dominée par les fournisseurs allemands, un seul acteur français (Phenix Systems) s'est positionné sur ce créneau, mais a récemment été racheté par un groupe américain.

- Les sous-traitants, spécialisés dans la fourniture de pièces mécaniques, en particulier à destination des secteurs aéronautique et médical. Il s'agit principalement de PME, pour lesquelles ces procédés constituent une alternative aux procédés traditionnels (frittage, forge et fonderie). Elles sont concernées à deux titres : tout d'abord, la possibilité de se positionner sur des segments jusque-là inaccessibles du fait des limitations des procédés conventionnels (contraintes liées à la fabrication et à l'amortissement des outillages, par exemple) ; ensuite, la possibilité d'élargir leur gamme vers des produits plus complexes, à plus haute valeur ajoutée.

Actuellement, ce type de sujet est relayé auprès des entreprises par des acteurs tels que le pôle ViaMéca ou le CETIM. Le principal soutien technique sur lequel elles peuvent s'appuyer est le CRITT MDTS, en notant toutefois que le rayonnement de ce dernier est essentiellement régional.

Dans ce domaine, la France n'a clairement pas eu un rôle de précurseur, mais se trouve plutôt dans la position d'un suiveur, avec un niveau de compétences suffisant pour l'intégration de ces procédés. L'enjeu maintenant est la diffusion plus large de ces technologies auprès des entreprises du secteur de la métallurgie au sens large, mouvement déjà amorcé, mais qui pourrait être amplifié :

- en associant à la démarche l'ensemble des acteurs concernés, y compris ceux positionnés sur l'amont, c'est-à-dire l'élaboration des poudres ;
- en mettant à disposition des PME industrielles des moyens de démonstration, permettant de valider les preuves de concept et d'assurer une plus grande diffusion des compétences, notamment à travers la formation ;
- en utilisant les opportunités offertes par la mise en place du cluster Mecafuture (voir à ce sujet le chapitre 5) et le Plan industriel « Usine du futur ».

3.3. Recyclage

3.3.1. Principe du procédé, variantes

Les déchets considérés dans le cas présent sont les déchets post-consommation, qui constituent un gisement majeur de matières premières secondaires, mais sont plus difficiles à capter que les déchets industriels. Les procédés de recyclage peuvent être décomposés en trois grandes étapes : 1. Comminution (démantèlement et broyage) ; 2. Concentration ; 3. Extraction.

Les procédés de récupération de la fraction métallique sont du même type que les procédés d'extraction du minerai, et se répartissent donc schématiquement de la façon suivante :

- procédés de pyroméallurgie ;
- procédés par voie thermique (distillation ou pyrolyse) ;
- procédés d'hydroméallurgie ;
- procédés d'affinage et de refusion (aluminium, cuivre, plomb, notamment).

On retrouve les mêmes grandes étapes que pour l'extraction minière. L'une des différences entre le recyclage et l'extraction minière est la plus grande diversité des métaux présents au stade de l'extraction : jusqu'à une dizaine de métaux lors de l'extraction minière, jusqu'à trois fois plus lors du recyclage.

3.3.2. Procédés concurrents

On ne peut pas réellement parler d'un procédé « concurrent » au recyclage. S'ils sont généralement complémentaires, l'extraction du métal primaire et le recyclage peuvent être considérés concurrents : si le prix d'un métal augmente, son recyclage à partir de telle ou telle ressource peut devenir rentable et représenter une réelle concurrence à la mine. De même, la mise en décharge est une concurrente du recyclage : certains déchets sont mis en décharge car leur valorisation coûte plus cher.

3.3.3. Périmètre : métaux concernés et enjeux

Tous les métaux du périmètre de l'étude, identifiés et regroupés dans le volet 1 sous les appellations métaux de base, métaux high-tech et métaux précieux sont concernés par le recyclage.

Suivant les métaux, les enjeux liés au recyclage sont différents. Deux grandes catégories peuvent être néanmoins distinguées :

- d'une part les métaux de base pour lesquels le recyclage présente généralement peu de verrous technologiques mais dont l'enjeu réside principalement dans la consolidation des filières de récupération. La qualité dans le tri des déchets est primordiale pour favoriser le recyclage : des progrès ont déjà été réalisés, mais il subsiste encore des marges d'amélioration en matière de tri. L'enjeu ici est bien de réussir à exploiter le maximum de gisements afin d'obtenir un taux de recyclage le plus élevé possible.
- d'autre part, les métaux high tech et les métaux précieux sont généralement intégrés dans des systèmes plus complexes qui nécessitent de mettre en œuvre des procédés multi-étapes,

généralement plus coûteux (notamment par hydrométallurgie). La rentabilité du recyclage de cette deuxième catégorie de métaux est donc plus difficile à atteindre. L'un des enjeux majeurs est donc le développement de procédés de recyclage plus rentables.

3.3.4. Ressources transformées

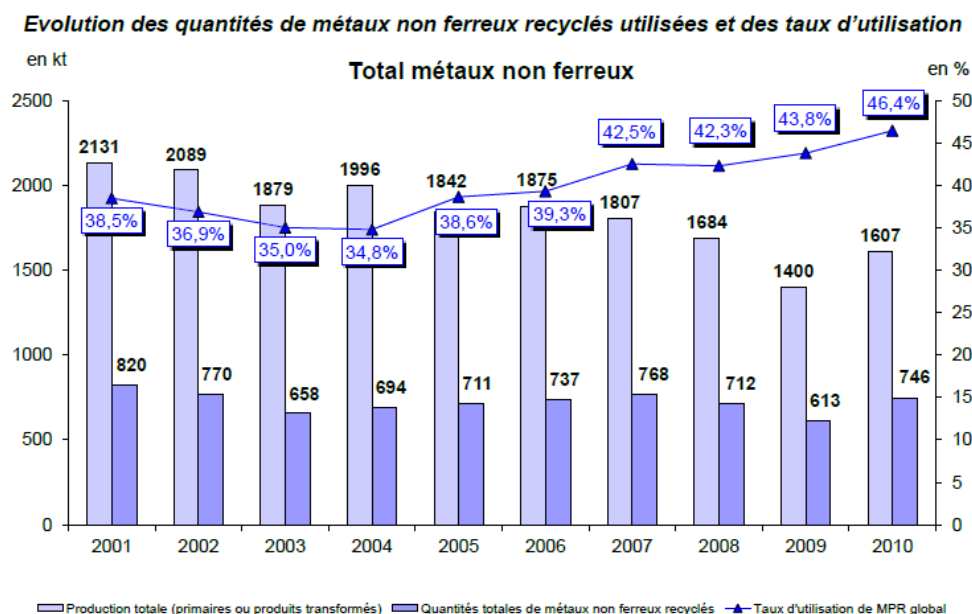
Les ressources potentiellement transformées sont multiples car elles proviennent potentiellement de tous les produits contenant des métaux non ferreux (déchets post-consommation).

Le gisement représenté par ce type de ressource est à envisager d'un point de vue dynamique ; les volumes concernés peuvent évoluer dans le temps, au fur et à mesure de la mise sur le marché de quantités croissantes de produits et de leur arrivée en fin de vie. C'est le cas par exemple des accumulateurs au lithium, des cartes électroniques, des lampes fluo compactes et des pots catalytiques des véhicules.

3.3.5. Volumes concernés, tendances d'évolution

C'est naturellement sur les métaux de base, auxquels sont associées des filières de collecte et de recyclage déjà établies, que les données disponibles permettent de suivre les tendances d'évolution. Ainsi, en 2010, la quantité totale de métal recyclé utilisée en France pour les quatre principaux métaux (aluminium, cuivre, plomb, zinc) s'élevait à 746 kt, soit un taux d'utilisation (quantité recyclée rapportée au total de la production de métal) de 46,4 %. Ce taux varie significativement selon le métal : 27,6 % pour le zinc, contre 94,8 % pour le plomb.

Graphique 4 : Recyclage de 4 métaux non ferreux (aluminium, cuivre, plomb, zinc) – quantités en jeu et taux d'utilisation en France



Source : Ademe, à partir de données FEDEM et AFA

Les données disponibles sur la période 2001-2010 font apparaître une augmentation régulière du taux d'utilisation de métal recyclé dans la production française. Dans le détail, cette augmentation

est principalement due à la baisse de la production totale, les quantités de métal recyclé étant relativement stables. Toutes proportions gardées, l'industrie française des métaux non ferreux est de plus en plus dépendante vis-à-vis des approvisionnements en déchets recyclables. Deux facteurs principaux conditionnent les évolutions à venir : d'une part, le cadre réglementaire favorise la collecte et le recyclage de déchets contenant des métaux ; mais d'autre part, la « fuite » de métaux non ferreux à recycler vers l'Asie déstabilise les filières de recyclage européennes.

S'agissant des autres métaux, les quantités en jeu sont nettement moindres. Certains gisements font l'objet d'une attention particulière, du fait de difficultés d'approvisionnement actuelles ou à venir, et/ou du niveau élevé du prix de certains métaux. Un extrait de l'étude de l'ADEME consacrée au potentiel de recyclage de certains métaux rares, explicite ainsi les gisements valorisables à partir des quatre applications mentionnées précédemment.

Figure 10 : Gisements de métaux disponibles à partir de certaines sources de déchets

Applications	Principales utilisations	Estimation des gisements de métaux collectables en France en 2008	Autres métaux présents
Accumulateurs Li-ion	Appareils portables (téléphones, ordinateurs, etc.) Véhicules hybrides et électriques Appareils industriels	Cobalt (Co) : 180 t Lithium (Li) : 18 t	-
Cartes électroniques	EEE	Argent : 60 t Palladium : 4 t Platine : 1 t	Gallium Rhodium Ruthénium Tantale
Lampes fluo compactes	Eclairage domestique Eclairage collectif	Terbium : < 25 t Europium : < 25 t Yttrium : > 120 t Gadolinium : < 25 t Lanthane : < 25 t Cérium : < 25 t	-
Pots catalytiques	Véhicules	Platine : 2 t Palladium : 0,3 t Rhodium : 0,5 t	Terres Rares (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme)

Source : Ademe, *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*

3.3.6. Verrous

Sans parler de technologie, l'un des premiers verrous concernant le recyclage est la massification (il s'agit de l'accès à la ressource, la collecte). La caractérisation des gisements reste un des défis importants ; la composition des déchets en métaux non ferreux est extrêmement mal connue. Aujourd'hui, les investissements des industriels sont limités car ils ne peuvent ni se projeter sur les volumes à traiter, ni sur la composition des gisements à traiter dont la variabilité pourrait avoir des conséquences sur les rendements de leur procédé.

Concernant les aspects plus techniques/technologiques, des questions portent sur la proportion entre démantèlement manuel et démantèlement mécanique. En effet, le début du procédé consiste en un démantèlement manuel, un axe d'étude actuel consiste à analyser à quel moment il devient pertinent de tout broyer ; c'est-à-dire, à quel moment le démantèlement manuel permet d'obtenir des éléments suffisamment homogènes à un coût raisonnable. De plus, l'efficacité du broyage (activité très consommatrice d'énergie) est analysée. Enfin, l'étude fine de la consommation en eau et en énergie des procédés de recyclage, ainsi que l'étude de l'évolution des cours des déchets et des matières secondaires sont clés pour évaluer la rentabilité du procédé de recyclage.

Suivant les métaux en jeu et les applications pour lesquelles une filière de recyclage pourrait être mise en place, les verrous ne sont pas identiques. Pour les quatre applications mentionnées dans le paragraphe précédent, on distingue différents cas de figure, dépendant principalement de la maturité des applications concernées. Tout d'abord, les lampes fluo-compactes existent depuis plusieurs années et leur composition est globalement bien établie, même s'il existe des variabilités entre les différents produits. Il est alors plus aisé de mettre au point un procédé de recyclage sur un système connu (ce qui n'empêche pas d'être confrontés à des défis technologiques découlant de la nature même du système).

Ensuite, certaines applications existent depuis de nombreuses années et sont en évolution continue, comme les cartes électroniques qui sont sous l'effet des innovations répétées dans le secteur de l'électronique, ou comme les pots catalytiques qui évoluent sous l'effet des réglementations anti-pollution et des innovations techniques. Pour ces applications, des gisements collectables significatifs sont disponibles mais leur variabilité est grande, aussi bien concernant la teneur en métaux non ferreux que la présence d'autres matériaux pouvant éventuellement interférer avec le recyclage de ces derniers.

Enfin, certaines applications comme les accumulateurs au lithium sont en plein développement et les produits en fin d'usage ne seront pas mobilisables avant plusieurs années. De plus, pour ces applications, les technologies utilisées ne sont pas stabilisées, il existe même généralement de nombreuses variantes, ce qui ajoute de la complexité aux gisements à traiter.

3.3.7. Principaux acteurs développant ce type de procédés

Aujourd'hui, la stratégie de recherche se construit d'une part, par objet de recyclage (pour les étapes de comminution et de concentration) et d'autre part, par métal ou famille de métal pour l'étape d'extraction. Par exemple, le BRGM étudie un procédé pour isoler les aimants permanents et obtenir en fin de procédé une poudre concentrée en terres rares. Cette poudre peut ensuite être traitée par Solvay-Rhodia, qui par ailleurs est capable de traiter des poudres concentrées en terres rares provenant des lampes fluocompactes (usine de La Rochelle, unique au monde).

Côté recherche académique, un nombre relativement restreint d'acteurs est positionné explicitement sur la thématique du recyclage. L'ICSM (Institut de Chimie Séparative de Marcoule) possède une thématique de recherche intitulée « Utilisation de nanomatériaux pour l'énergie et le recyclage » qui recouvre notamment l'extraction de métaux contenus dans des déchets par liquide ionique. Le laboratoire CEM (Chimie et Electrochimie de Matériaux), de l'Institut Jean l'Amour effectue des recherches axées sur l'étude et l'exploitation de la réactivité chimique et électrochimique de matériaux minéraux sur les thématiques liées aux énergies renouvelables et à la valorisation des déchets.

Côté industrie, le groupe ERAMET possède trois filiales positionnées spécifiquement sur le recyclage des métaux. La filiale française, Valdi, est spécialisée dans le recyclage de métaux à partir de piles et accumulateurs, de catalyseurs usagés de la pétrochimie et de déchets provenant de la métallurgie des aciers inoxydables. En Belgique, la filiale Erachem Comilog Terte a des activités dans la production de sels et oxydes de cuivre à partir de solutions utilisées dans la fabrication de circuits imprimés et d'autres déchets. GCMC, implantée aux États-Unis, est positionnée sur le recyclage de métaux à partir de catalyseurs usagés de la pétrochimie.

Outre ce grand groupe, le tissu français comporte :

- des entreprises pratiquant le recyclage, par refusion et le cas échéant affinage, de métaux de base, tels que l'aluminium (ex. : Affinerie d'Anjou, Affimet) ou le cuivre (ex. : M-Lego) ;
- des entreprises spécialisées dans la récupération de la fraction métallique de certains déchets, à l'instar de Recytech (recyclage de poussières d'aciéries électriques et de fonderies en vue de la récupération du zinc).

Les deux grands groupes internationaux français positionnés sur le traitement des déchets (Suez et Veolia) possèdent des activités dans le recyclage des métaux :

- le groupe Sita (groupe Suez) possède des filiales impliquées dans le recyclage de métaux de base : on peut noter principalement Next Metal (activités de recyclage et de valorisation des déchets de câbles cuivre et aluminium) et Boone Comenor Metalimpex, une filiale américaine, positionnée sur le recyclage des déchets métalliques des métaux de base ;
- le groupe Veolia Propreté possède deux filiales localisées en France travaillant sur la thématique du recyclage des métaux non ferreux : Bartin Recycling, dont les activités sont centrées sur le recyclage et la valorisation des ferrailles et des métaux et Eurodieuze, dont les activités sont centrées sur le recyclage par voie hydrométallurgique des batteries nickel-cadmium, nickel-métal-hydrure et lithium-ion.

Outre Valdi et Eurodieuze, plusieurs entreprises françaises (PME ou ETI) sont positionnées sur le recyclage des piles et des batteries : SNAM (groupe Floridienne, Belgique) est spécialiste du recyclage par voie thermique des batteries Nickel-Cadmium, Nickel-Métal-Hydrure et Lithium-Ion ; Recupyl est actif sur le recyclage par voie hydrométallurgique des batteries Nickel-Cadmium, Nickel-Métal-Hydrure et Lithium-Ion ; Recylex, STCM et GDE sont positionnés sur le recyclage des accumulateurs au plomb.

En Europe, l'Allemagne est présente sur le recyclage avec notamment les sociétés Aurubis pour la récupération de métaux précieux des cartes électroniques et BASF pour la récupération de métaux précieux des pots catalytiques. L'entreprise suédoise Boliden est également positionnée sur la récupération de métaux précieux des cartes électroniques, ainsi que Umicore en Belgique, et l'entreprise anglaise Johnson Matthey s'occupe de la récupération de métaux précieux des pots catalytiques.

3.3.8. Perspectives

Historiquement, les activités de recyclage de métaux se sont développées sans qu'il y ait d'impulsion particulière de la part des pouvoirs publics : les barrières techniques au recyclage étaient limitées (du moins pour certains types de métaux), l'intérêt économique avéré, et les filières de collecte, plus ou moins organisées (voire informelles), se sont spontanément mises en place.

La situation actuelle est caractérisée par une extension continue du périmètre des déchets contenant des métaux à recycler, que cette extension soit motivée par des raisons avant tout économiques (liées au cours des matières premières) et/ou résulte d'obligations réglementaires (voir à ce sujet le volet dédié à la réglementation de la présente étude).

Chaque cas est particulier, et doit être abordé de façon spécifique, selon la nature du déchet considéré et des métaux à récupérer. Les verrous sont de natures diverses, et d'importance relative suivant le cas considéré :

- l'accès au gisement, l'efficacité de la collecte et la massification des flux ; voir par exemple le cas de métaux à haute valeur de marché mais présents en faibles quantités dans des déchets à caractère « diffus » (ex. : métaux précieux dans les cartes électroniques, platinoïdes dans les pots catalytiques), ou bien le cas de métaux de base ayant de multiples applications dans des secteurs diversifiés (ex. : aluminium) ;
- la maîtrise du coût du recyclage, aussi bien pour les métaux de base, pour lesquels il n'y a par ailleurs pas de perspectives de pénurie à court ou moyen terme, et donc pour lesquels le métal recyclé doit pouvoir concurrencer le métal primaire (ex. : aluminium, cuivre, zinc), que pour ceux nécessitant des opérations plus complexes, dont l'amélioration peut permettre de baisser les coûts de recyclage ;
- la nécessité de réaliser les opérations de recyclage dans des conditions contrôlées (ex. : plomb, cadmium), le cas échéant dans la perspective d'un recyclage en « boucle fermée » (le plomb issu de batteries recyclées est essentiellement réutilisé pour la fabrication de batteries neuves) ;
- le caractère « émergent » du gisement, qui apparaît progressivement en raison de l'arrivée en fin de vie de « nouveaux » produits (ex. : batteries au lithium).

Les enjeux en matière de recherche et d'innovation portent aussi bien sur des questions de procédés que sur des questions connexes (ex. : moyens rapides d'identification et de séparation des différents types d'alliages), et doivent être abordés en relation étroite avec les autres enjeux. En tout état de cause, chaque cas doit être abordé de façon intégrée : organisation de la collecte, moyens industriels nécessaires aux opérations de recyclage (avec les verrous techniques éventuellement associés), coûts complets de l'opération et viabilité des débouchés commerciaux des matières premières secondaires.

La tendance actuelle est à la multiplication des initiatives visant à l'émergence de nouvelles filières de recyclage, au-delà des filières qui ont été mises en place suite à l'instauration d'obligations réglementaires affectant certaines catégories de déchets (emballages, véhicules hors d'usage, batteries, déchets électriques et électroniques, etc.) ; c'est le cas, par exemple, des navires hors d'usages, des avions en fin de vie, ou bien encore des produits d'ameublement. On peut souligner au passage la capacité française à organiser des filières de récupération et de négoce, portées à la fois par des grands groupes et des indépendants – ces différents acteurs opérant toutefois en permanence des arbitrages entre recyclage sur le territoire national et valorisation des déchets à l'export.

Si les alliages ferreux représentent la plus grande part des métaux à récupérer, l'industrie des métaux non ferreux est potentiellement concernée par nombre de ces nouvelles filières. Il est toutefois difficile d'en avoir une vision d'ensemble, la mise en place de ces filières de recyclage se faisant en ordre dispersé ; dans nombre de cas toutefois, ces initiatives sont impulsées par les fabricants et importateurs eux-mêmes, à travers les instances les représentant (fédérations professionnelles, comités de filière, pôles de compétitivité, etc.) ou bien directement par les grands donneurs d'ordre.

Dans ce contexte, l'identification des filières de recyclage émergentes et l'implication en amont, au stade de l'élaboration des projets, représentent un enjeu majeur pour l'industrie des métaux non ferreux. Du point de vue recherche et innovation, il s'agit en particulier d'identifier et de qualifier les verrous technologiques du point de vue des procédés, de façon à pouvoir mobiliser les compétences nécessaires pour les lever, ainsi que, si nécessaire, les leviers de financement adéquats – les dispositifs tels que celui géré par l'ANR ou le FUI, mais aussi les programmes européens, pouvant être mobilisés pour de tels projets.

En tout état de cause, dans ce contexte a priori favorable, il s'agit de « transformer l'essai », c'est-à-dire de s'assurer de la capacité d'absorption des flux de déchets par l'industrie française, fortement concurrencée sur ce terrain par ses voisins allemands, italiens ou bien encore espagnols, comme l'ont montré les deux premiers volets de la présente étude. À cette fin, il est nécessaire de développer et de mobiliser une expertise suffisante permettant d'analyser la viabilité des modèles technico-économiques, de sécuriser (autant que faire se peut) l'accès aux gisements et de mettre en place des conditions d'industrialisation favorables, en relation avec les investissements nécessaires – qu'il s'agisse d'extension de la capacité de traitement des industriels des métaux non ferreux existants ou de la création d'activités nouvelles à partir de nouveaux procédés issus de projets de recherche.

3.4. Stockage électrochimique de l'électricité

Le stockage de l'électricité est à envisager sous deux angles :

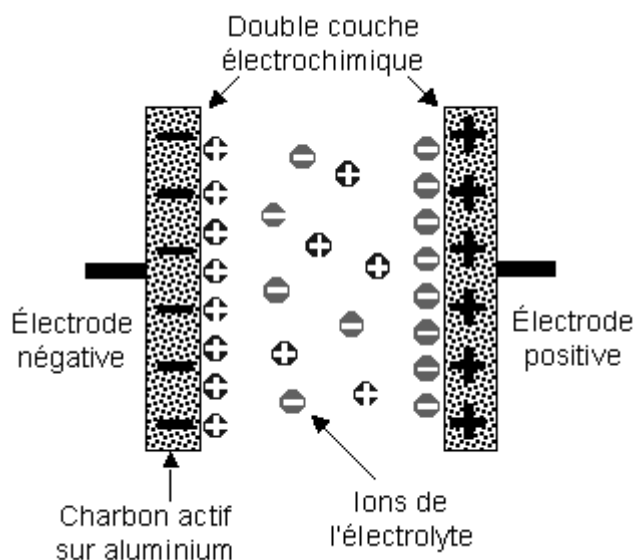
- les applications fixes ; il représente un enjeu fort pour le développement de formes de production d'énergie à caractère intermittent, comme le photovoltaïque ou l'éolien ainsi que pour le développement de véhicules électriques. Le stockage permettra d'augmenter la flexibilité dans la gestion de l'électricité provenant de sources intermittentes et donc de rendre le réseau plus sûr.
- les applications embarquées ; pour le développement de véhicules électriques, les principaux enjeux sont la réduction de la masse des dispositifs, l'augmentation de l'autonomie des véhicules et la fiabilité des systèmes.

Deux technologies principales permettent de répondre à cet enjeu : les super-condensateurs (ou super-capacités) et les batteries ou accumulateurs rechargeables. Dans ces deux cas, les enjeux liés aux métaux sont différents.

Les super-condensateurs répondent bien aux enjeux du stockage de l'énergie, notamment pour leurs propriétés de charges/décharges rapides, et du fait de leur capacité à restituer une puissance électrique élevée. Ils sont principalement destinés aux véhicules électriques, pour lesquels ils se développeront en parallèle des batteries qu'ils complètent.

Les super-condensateurs sont constitués de deux électrodes poreuses, généralement en charbon actif, imprégnées d'électrolyte et séparées par une membrane isolante et poreuse. Ci-dessous est présenté un schéma simplifié de la structure d'un super-condensateur.

Figure 11 : Schéma simplifié de la structure d'un supercondensateur



Source : article Supercondensateurs, Wikipedia

Les métaux n'ayant pas de rôle au niveau des matériaux actifs, cette technologie ne sera pas donc pas détaillée plus avant.

La suite de ce chapitre concernera donc uniquement l'application des batteries.

3.4.1. Périmètre

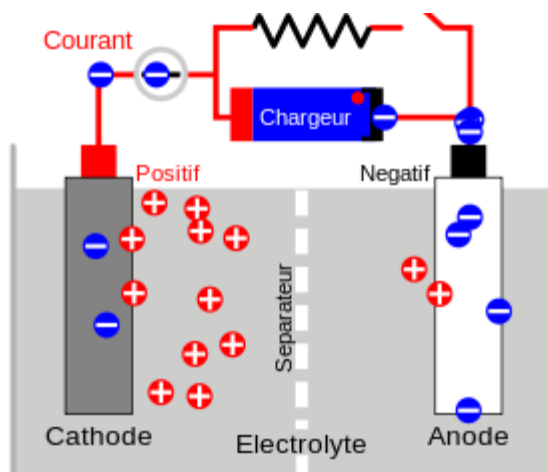
Actuellement, les batteries reposent sur trois technologies principales : les batteries à base de plomb, celles à base de nickel ou celles à base de lithium. Dans le cas présent, seules les batteries au plomb, technologie historique mais dont les marchés actuels sont toujours en croissance au niveau mondial, et celles au lithium, qui font l'objet de nombreux développements ces dernières années, sont considérées.

3.4.2. Description d'une batterie

Les batteries sont des batteries rechargeables dans lesquelles lors de la charge, le transport de charges entre l'électrode négative (l'anode) et l'électrode positive (la cathode) est assuré par des ions à travers l'électrolyte. La nature des électrodes et de l'électrolyte peut varier suivant le type de batterie considéré.

Le schéma ci-dessous illustre le fonctionnement d'une batterie en mode charge.

Figure 12 : Illustration d'une batterie (mode charge)



Source : article Accumulateurs électrochimiques, Wikipedia

3.4.3. Fonction(s) apportée(s) par le(s) métal (métaux) au niveau du produit final

Les batteries au plomb sont relativement lourdes, étant donné leur densité d'énergie massique : 30-50 Wh/kg ; pour les technologies lithium, cette valeur est quatre fois supérieure : 120-200 Wh/kg. Les batteries au plomb présentent toutefois l'avantage d'être relativement peu coûteuses en comparaison de leurs concurrentes et d'avoir une autodécharge faible (environ 5 %/mois). L'électrolyte est principalement constitué de l'ion hydrogènesulfate en solution d'où l'appellation parfois employée de batteries plomb-acide.

D'une part, ces batteries sont destinées à des applications stationnaires telles que l'alimentation électrique des circuits de signalisation ou d'éclairage de réseaux ferroviaires, ou le couplage avec les panneaux solaires (dans ce cas, le panneau solaire alimente le circuit électrique et charge la batterie le jour et la batterie alimente le circuit la nuit). D'autre part, les batteries au plomb sont utilisées pour les véhicules thermiques et permettent notamment le démarrage du véhicule. De plus,

les chariots élévateurs utilisent également des batteries au plomb. Pour ces chariots, le poids de la batterie est un avantage car elle sert de contre-poids à la charge transportée.

Les tendances dans le développement des batteries au plomb s'orientent principalement vers un affranchissement de l'utilisation de certains métaux rares tels que l'antimoine. En ce sens, Enersys développe actuellement une batterie au plomb pur. L'antimoine est principalement utilisé pour durcir le plomb, améliorer l'adhésion de la masse active et protéger la batterie contre la corrosion. Des composants additionnels, tels que le sélénium et l'arsenic, étaient également ajoutés pour améliorer encore ces propriétés. Par ailleurs, le développement des électrolytes gélifiés a permis d'améliorer la sécurité des batteries au plomb.

Le lithium est le plus léger et le plus réducteur des métaux solides. Les systèmes à base de lithium permettent d'offrir les propriétés suivantes :

- densité d'énergie massique plus élevée ;
- batteries non sensibles à l'effet de mémoire : les batteries sensibles à l'effet de mémoire perdent en capacité de stockage d'énergie si elles ne sont pas déchargées complètement avant une recharge ; cela représente un inconvénient fort en termes de flexibilité d'utilisation ;
- autodécharge atteignant seulement quelques pourcents par mois ;
- batteries ne contenant pas de métaux lourds.

Les points suivants décrivent les principaux types de batteries au lithium existants.

Technologie Li-ion

Cette technologie utilise une cathode en oxyde de cobalt ou à base d'oxydes mixtes de cobalt/lithium ou lithium/manganèse (LiCoO_2 , LiMnO_2 , Li_2MnO_4) et parfois d'oxyde de vanadium (V_2O_5). L'anode est en graphite pur, en oxyde de titane si l'on veut améliorer la puissance ou en silicium si l'on veut améliorer la quantité d'énergie stockée. L'électrolyte est une solution liquide à base de carbonate de lithium (Li_2CO_3) et d'un composé à base de phosphore et de soufre (PS_6).

Technologie LiPo (Lithium – Polymère)

Cette technologie est une variante de Li-ion pour laquelle la cathode est à base de phosphate de métal, généralement du fer (LiFePO_4). Ceci assure une meilleure stabilité à l'électrolyte et réduit le coût grâce à une électrode qui ne fait plus appel au cobalt.

Technologie LMP (Lithium - Métal - Polymère)

Pour cette technologie, l'électrolyte est solide. Les accumulateurs LMP se présentent sous la forme d'un film mince enroulé. Ce film, d'une épaisseur de l'ordre d'une centaine de micromètres, est composé de cinq couches :

- anode : feuillard de lithium
- électrolyte : composé d'un polymère (polyoxyéthylène (POE) ou TSFI (ter-fluoro-sulfonimide) par exemple) et de sels de lithium.
- cathode : composée d'oxyde de vanadium (sans cobalt), de carbone et de polymère.
- collecteur de courant : feuillard de métal, permettant d'assurer la connexion électrique.
- isolant

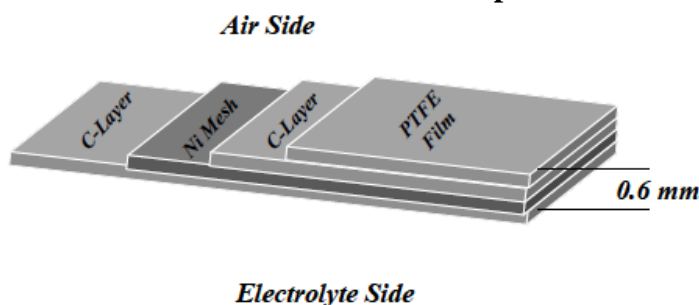
Technologie lithium-air

Grâce à cette technologie, peu mature actuellement, les perspectives futures de performance massique sont multipliées par 10 par rapport aux technologies actuelles au lithium. Toutefois, cette technologie ne change pas la quantité de lithium nécessaire qui, pour la même énergie stockée, reste identique à celle des autres technologies au lithium. Cela ne permet donc pas de réduire la

consommation de lithium pour ces batteries. L'anode est en lithium ; la cathode, composée de plusieurs couches se compose de la manière décrite dans le schéma ci-après.

Une membrane en téflon (PTFE) isole la cellule de l'eau contenue dans l'atmosphère (étant donné que l'anode est en lithium, métal très réactif au contact de l'eau, il est nécessaire d'empêcher que toute contamination de ce type ne se propage dans l'électrolyte, y compris *via* la cathode). La couche « C » est une couche en carbone qui contient des métaux catalyseurs de la réaction de réduction d'O₂ contenu dans l'air. Par exemple, ces catalyseurs peuvent être du manganèse (il donne les meilleurs résultats), du cobalt, du ruthénium, du platine, de l'argent ou un mélange de cobalt et de manganèse. Enfin la couche de nickel fait office de collecteur de courant.

Figure 13 : Schéma illustratif des différentes couches composant une batterie Lithium-Air



Ainsi, au lieu de contenir des oxydes, la batterie utilise l'oxygène de l'air pour fonctionner, ce qui permet d'économiser en masse et en volume.

3.4.4. Possibilités de substitution, solutions concurrentes

Il existe principalement une technologie concurrente des batteries au lithium et des batteries au plomb : les batteries au nickel (nickel-cadmium, nickel-métal-hydrure, sodium-chlorure de nickel et nickel-zinc). Une comparaison de ces différents systèmes est réalisée à la Figure 14.

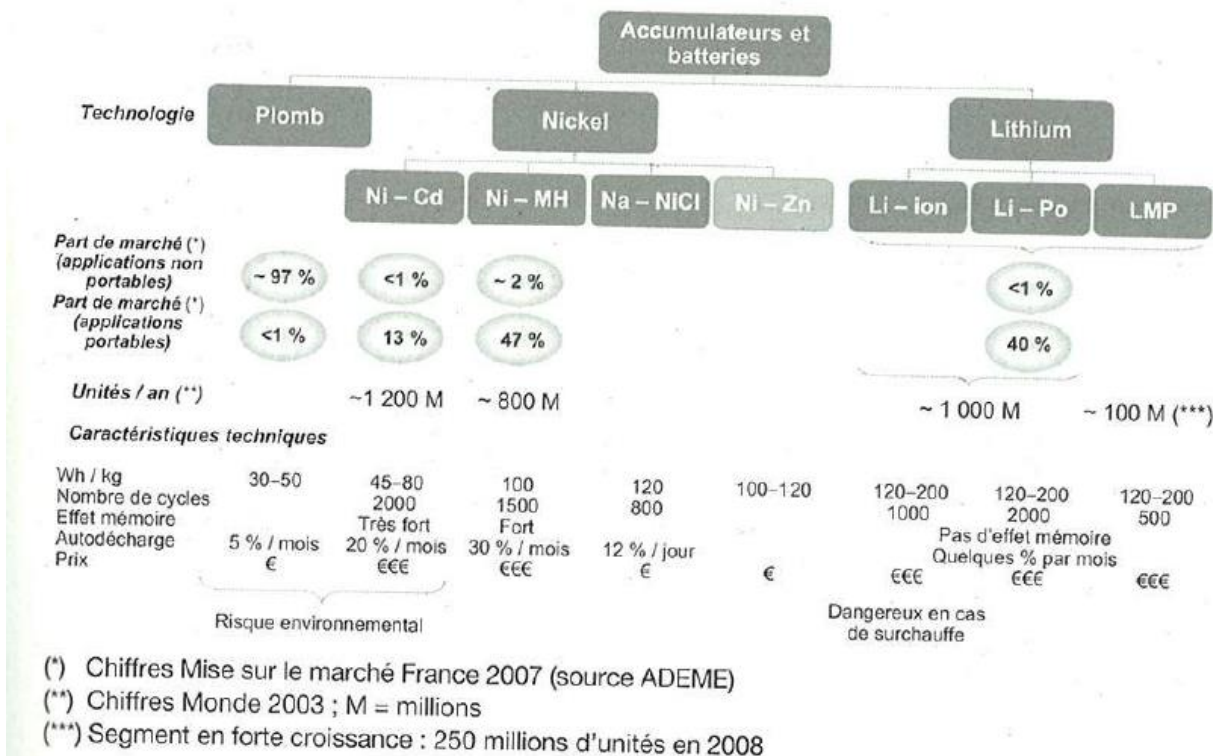
Les batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) sont en déclin en raison de la toxicité du cadmium et sont maintenant destinées aux applications industrielles dans lesquelles la récupération et le recyclage du cadmium peuvent être assurés dans de bonnes conditions.

En ce qui concerne les coûts, les technologies plomb, sodium-chlorure de nickel (Na-NiCl) et nickel-zinc (Ni-Zn) sont les plus avantageuses. Les technologies lithium (Li) et nickel-métal-hydrure (NiMH) sont les plus onéreuses.

Du point de vue des performances, les batteries au lithium possèdent les densités d'énergie massique les plus élevées, l'absence d'effet mémoire et seulement quelques pourcents par mois d'autodécharge. Les batteries au nickel présentent des taux d'autodécharge relativement élevés et pouvant aller jusqu'à 30 % / mois dans le cas des NiMH. Les NiMH ont également le désavantage d'être sujette à un fort effet mémoire.

La filière plomb reste dominante sur les applications stationnaires. Toutefois, les technologies au lithium réunissent la plus grande partie des recherches. A titre d'exemple, parmi les projets collaboratifs en lien avec les métaux non ferreux recensés au cours de cette étude, 12 projets portent sur les batteries au lithium parmi les projets portant sur la thématique de l'énergie (voir détail au paragraphe 4.2).

Figure 14 : Accumulateurs et batteries, parts de marché et principales caractéristiques



Source : Quel futur pour les métaux ?, EDP Sciences, 2010

Plus récemment, des systèmes de stockage électrochimique baptisés « batteries à flux redox », reposant sur des échanges entre phases liquides contenant des ions métalliques (le plus souvent, vanadium) à différents états d'oxydation, sont apparus ; ces systèmes seraient essentiellement destinés à du stockage stationnaire de grande capacité. Les piles à combustible, les supercondensateurs et les isolants d'inertie sont également concurrents des batteries, bien que de manière indirecte.

3.4.5. Quantités en jeu

Les batteries au plomb sont un marché en croissance. A lui seul le marché des batteries au plomb pour l'automobile pourrait atteindre 11 milliards d'euros d'ici 2015. La production mondiale de plomb en 2012 était d'environ 10 Mt et 77 % du plomb, soit 7,7 Mt est destiné au marché des accumulateurs².

Parmi les métaux utilisés pour les différentes technologies mentionnées ci-dessus, le lithium et le cobalt sont les principaux concernés : 20 % du lithium et 25 % du cobalt produits actuellement sont destinés au marché des batteries. La consommation mondiale de lithium était estimée en 2008 à 3,94 kt pour le marché des batteries. Cela correspond à environ 1 milliard de batteries produites, soit environ un tiers de la production mondiale de batteries.

Si l'on considère l'usage des batteries pour l'automobile, il faut compter environ 4 kg de lithium (ou 20 kg de carbonate de lithium) et 3 kg de cobalt par véhicule ayant une autonomie de 300 km.

² Source : volet 1 de cette étude.

La question de l'approvisionnement et des ressources disponibles se pose différemment pour ces deux métaux :

- La production de lithium est faite principalement à partir de saumures (en Amérique latine), mais la part produite à partir de minerai (Chine, Australie, etc.), autrefois moins rentable, est croissante ; actuellement, ce sont principalement les besoins pour les batteries qui tirent la croissance de la production de lithium. De ce fait, les nouveaux projets d'extraction de lithium ont tendance à se multiplier. Si l'on considère, d'une part, l'évolution de la demande en lithium (batteries, mais aussi industrie du verre et alliages pour l'aéronautique), et, d'autre part, l'évolution de la capacité d'extraction et de production de lithium, il ne semble pas qu'il y ait de risque significatif de pénurie à court ou moyen terme.
- La croissance de la demande en cobalt est principalement tirée par les besoins pour les batteries, suivis par les superalliages pour l'aéronautique. La moitié des minerais contenant du cobalt est extraite en République Démocratique du Congo, et la Chine représente à elle seule plus de 40% de la production de cobalt métal. Les cours de ce dernier sont très volatils, mais se maintiennent en moyenne à des niveaux élevés.

Dans la pratique, s'agissant de recyclage, dans le contexte technico-économique actuel, c'est la récupération du cobalt – et non du lithium – qui permet principalement rentabiliser l'opération.

3.4.6. Impact sur le coût du produit final

Le coût d'une batterie au plomb s'élève à environ 150-200 €/kWh pour les utilisateurs finaux, mais il est d'environ 25 €/kWh lorsque des volumes sont achetés, comme c'est le cas par exemple pour l'industrie automobile. En 2007, le coût du plomb représentait 55 à 75 % du coût d'une batterie³. Cette proportion est probablement légèrement inférieure aujourd'hui car le cours du plomb est en baisse depuis 2010.

Figure 15 : Coûts des différentes batteries à destination des véhicules électriques (en US\$/kWh)

Battery system (complete system without charger)	2012	2015	2020
Li-ion (includes sophisticated BMS & cooling)	600-750	400-500	250-300
NiMH (includes simple BMS & cooling for HEV only)	500-700	400-500	350-400
NiCd (includes simple controller)	400-600	350-450	300-350
Lead-acid (includes simple controller)	220-250	200-220	180-200

Source : Roland Berger, *Technology & Market Drivers for Stationary and Automotive Battery Systems, 2012*

Le coût d'une batterie au lithium s'élève aux alentours de 600 €/kWh. Le coût des piles et batteries au lithium-ion provient en grande partie des matériaux utilisés à la cathode qui contient du cobalt et/ou du nickel. Le coût du lithium représente une faible part dans le coût d'une batterie et s'élève en moyenne à 3 % du coût total.

³ Source : EMROL, 2007

La batterie est l'un des principaux éléments de coût d'un véhicule électrique. Ainsi, pour que ces véhicules soient compétitifs face aux véhicules thermiques, un coût cinq à six fois inférieur au coût actuel serait plus acceptable en termes de compétitivité.

3.4.7. Possibilités de recyclage (en boucle fermée ou pour d'autres applications)

Les batteries au plomb sont quasiment 100 % recyclables. Leur filière de recyclage est d'ailleurs bien développée en France, comme dans de nombreux pays développés. En France, 229 533 tonnes d'accumulateurs au plomb ont été traitées en 2009 (dont 18 % en provenance de l'étranger), dont 213 731 tonnes d'accumulateurs automobiles et 15 802 tonnes d'accumulateurs industriels. Parmi ces 229 533 tonnes, 193 240 tonnes ont été traitées par valorisation matière, 13 594 tonnes ont été valorisées énergétiquement (parties en matière plastique, par exemple) et 16 024 tonnes ont été détruites (le reste étant des pertes matières au cours des traitements)⁴.

Pour le lithium, il est, dans un premier temps, utile de signaler qu'il existe au moins autant de procédés de recyclage de batteries que de types de batteries considérés. En effet, les procédés de récupération des métaux étant généralement très dépendants de la constitution globale de la matrice, ils sont difficilement transposables tels quels d'un type de batterie à un autre, qui peut chacun avoir des anodes, des cathodes et des électrolytes différents.

D'après une étude de 2011 du BRGM sur les filières du lithium, la filière de récupération effective du lithium des piles et batteries se met désormais en place progressivement. La société française Recupyl et la société californienne Toxco produisent déjà du lithium recyclé à partir des batteries et piles. Recupyl annonce au stade pilote une récupération de 98 % du lithium contenu avec son procédé hydrométallurgique breveté. En 2011, le groupe japonais Nippon Mining & Metals a mis en fonction, avec l'aide du METI (Ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie) une unité industrielle de recyclage des cathodes de batteries lithium-ion, afin de récupérer le cobalt, le nickel, le lithium et le manganèse.

Par ailleurs, certains procédés sont encore du domaine de la R&D. Ils concernent généralement des procédés par voie hydrométallurgique comme par exemple le projet Cyclade, coordonné par Recupyl, qui doit permettre de produire du carbonate de lithium susceptible d'être réutilisé pour produire de nouvelles cathodes pour des batteries Li-ion.

D'après l'étude du BRGM citée précédemment, si l'on considère une durée de vie des batteries de 10 à 15 ans, la part du recyclage en boucle fermée dans l'offre ne deviendra significative qu'à partir de 2025 ou 2030, le temps que les gisements soient exploités ou exploitables. L'un des principaux enjeux qui permettra la mise en place de filières de recyclage efficaces est la standardisation des batteries car aujourd'hui, au sein des technologies au lithium, de nombreuses variantes existent pour les matériaux utilisés pour la cathode, l'anode ou l'électrolyte. A ce titre, en 2011, un projet allemand (LiBRI pour Lithium Battery Recycling Initiative) a été initié afin d'identifier des éléments nécessaires pour concevoir spécifiquement une batterie dont le recyclage serait facilité.

⁴ ADEME, Etat de l'art des technologies de désulfatation des accumulateurs au plomb, 2011

3.4.8. Verrous

Les batteries au plomb ont plus de cent ans d'existence mais des améliorations sont toujours en cours. Par exemple, l'utilisation de nouveaux matériaux permet d'augmenter la densité d'énergie massique des batteries et des améliorations de conception permettent de réduire la résistance électrique interne de la batterie. Par ailleurs, le développement du procédé de désulfatation des électrodes ainsi que des améliorations de conception offrent la possibilité de doubler la durée de vie des batteries plomb-acide. De nombreux développements sont également réalisés dans l'amélioration de procédés dans le but de réduire les coûts de production des batteries. En ce qui concerne les électrodes, de nouveaux matériaux sont testés comme des électrodes au plomb pur, permettant notamment de s'affranchir de l'emploi d'éléments tels que l'antimoine ou l'arsenic (substances classées comme toxiques).

Les batteries au lithium ont un risque d'explosion, ce qui constitue un frein important à leur développement. Les principales recherches concernant la batterie Li-ion se situent au niveau des matériaux. En effet, de meilleures performances au niveau de la capacité de stockage des batteries sont recherchées par l'intermédiaire des nanomatériaux, qui permettent notamment d'améliorer la réactivité du fait de leur plus grande surface spécifique. D'après le Sirris, le centre collectif de l'industrie technologique belge, les principaux travaux concernent les points suivants :

- En ce qui concerne l'anode, la recherche est surtout axée sur des nanomatériaux à base de carbone et des alliages de lithium. L'analyse des brevets réalisée par Sirris révèle également des matériaux prometteurs : les alliages intermétalliques nanocristallins, les nanocomposites, les nanotubes ou nanofibres de carbone et les nanooxydes de métaux de transition.
- Des nanomatériaux divers sont explorés pour la cathode, par exemple LiCoO_2 , LiFePO_4 , et LiMn_2O_4 (oxydes mixtes à base de lithium, fer et manganèse), nanotubes et nanofibres de carbone.
- Des nanopoudres métal-oxyde, des nanoparticules métalliques ou des nanotubes de carbone sont ajoutés à l'électrolyte polymère pour améliorer ses performances dans les batteries à l'état solide.

En ce qui concerne la technologie lithium-air, les principaux verrous sont le faible nombre de cycles de charge et décharge et l'instabilité de l'anode.

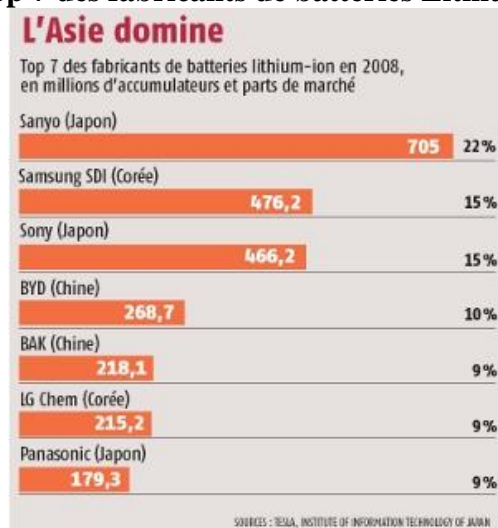
3.4.9. Principaux acteurs développant l'application

Comme cela est représenté sur le graphique ci-après, l'Asie domine le secteur des batteries Li-ion. Elle représente à elle seule 89 % de la production mondiale de batteries Li-ion en 2008.

La Chine est le plus grand producteur, consommateur et exportateur de batteries plomb-acide dans le monde. Les autorités chinoises soutiennent et restructurent la filière de recyclage des batteries au plomb sur son territoire, car seulement 30% des batteries sont pour l'instant recyclées dans le pays (voir à ce sujet les paragraphes consacrés à la Chine dans le volet de la présente étude consacré aux aspects réglementaires). En dehors de Chine, les acteurs développant des batteries au plomb sont principalement les sociétés américaines Exide et Enersys, qui ont chacune des sites de production en France. L'entreprise japonaise Yuasa et les entreprises Johnson Controls et Steco Power sont également très présentes sur le marché mondial. En France, l'entreprise Accumulateur Huitric est

également présente. Les entreprises BGS (Batteries Global Services) ou Regenebatt réalisent les opérations de désulfatation.

Figure 16 : Classement du top 7 des fabricants de batteries Lithium-ion en 2008



Source : Usine Nouvelle

En France, s'agissant des batteries au lithium, les deux producteurs sont Batscap, détenu à 95 % par Bolloré (production de batteries LMP) et Saft (production de batteries Li-ion).

S'agissant des acteurs académiques français, on recense principalement :

- le LRCS (Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides, Université de Picardie) : une expertise plus particulière du laboratoire concerne les matériaux pour générateurs électrochimiques et systèmes électrochromes. Cela concerne différents types de batteries (batteries alcalines, au plomb et au lithium).
- l'Institut Charles Gerhardt Montpellier (France) : réactivité des surfaces et synthèse de matériaux architecturés à destination du stockage de l'énergie.
- l'iCMCB (Bordeaux), avec des compétences internationalement reconnues dans le domaine du stockage électrochimique de l'énergie (batteries au lithium, batteries alcalines, microbatteries), de la production d'énergie (piles à combustible).
- le LITEN (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles, CEA), pour le développement de batteries au lithium.

3.4.10. Perspectives

Les deux cas présentés – plomb et lithium – correspondent à deux problématiques très différentes. Elles ont toutefois un point commun : le rôle joué par les donneurs d'ordre, qui sont par ailleurs, en France, en nombre très limité :

- pour les batteries au plomb, il s'agit d'Exide (la maison-mère américaine étant actuellement sous la loi de protection des faillites), Accumulateurs Huitric et Enersys (Arras)
- pour les batteries au lithium, il s'agit de Saft et Batscap.

Le principal enjeu pour la filière des métaux non ferreux est d'être en mesure de fournir des matériaux susceptibles de répondre aux spécifications de ces donneurs d'ordres, de façon à accompagner les évolutions technologiques dans la conception des batteries. Cela concerne trois métaux : lithium, cobalt et plomb.

Dans le cas des batteries plomb-acide, la situation des fabricants français est un facteur de fragilité. Alors que le marché pour ce type de batteries est loin d'être en régression, la position française s'est fortement dégradée, avec un risque d'atteindre un seuil sous-critique. L'avenir de la filière dépendra du maintien sur le territoire du couple producteurs de plomb/fabricants de batteries, dont les activités sont étroitement liées. Dans ce domaine, les efforts d'innovation sont réels, et les acteurs de la métallurgie doivent être en mesure de répondre aux besoins liés aux développements en cours.

S'agissant des batteries au lithium, la filière bénéficie du rôle moteur joué par de grands donneurs d'ordre, pouvant par ailleurs s'appuyer sur des compétences académiques de haut niveau. La France se maintient donc dans la course, et l'enjeu est plutôt d'assurer la continuité, notamment du point de vue du soutien public à la R&D, ce qui a été le cas jusqu'à ce jour (le tableau présenté en introduction du chapitre 3 en est l'illustration). Du point de vue de la composante « métal » proprement dite, la filière batteries au lithium bénéficie du positionnement en amont d'un acteur majeur tel qu'ERAMET, au travers de projets de diversification (exemple de l'exploitation des lacs salés riches en lithium en Argentine, grâce à un procédé développé au sein de son centre de R&D) ; en aval, il existe des projets innovants sur le recyclage, qui est actuellement émergent. Reste la question du cobalt : Eurotungstène (groupe ERAMET) fabrique des poudres de cobalt. La récupération du cobalt lors du recyclage est une priorité, un risque étant les « fuites de matières » en cas d'exportation de batteries usagées.

3.5. Alliages hautes performances

3.5.1. Périmètre

Parmi les alliages haute performance, on s'intéresse dans le cas présent plus particulièrement aux superalliages et aux alliages intermétalliques. Les principales applications présentées dans le cadre de ce chapitre concernent principalement l'aéronautique, même si d'autres secteurs sont évoqués.

L'élaboration des superalliages consiste à produire par fusion dans un four électrique un alliage de composition parfaitement maîtrisée à partir de métaux primaires et de chutes d'alliages recyclés. Après l'élaboration, la mise en forme de la matière est faite par des moyens mécaniques, généralement à chaud : matriçage (pressage à chaud entre deux matrices usinées aux formes de la pièce), forgeage ou laminage.

3.5.2. Description

Les superalliages sont des alliages qui ont une excellente résistance mécanique et une bonne résistance au fluage à haute température (typiquement 0,7 à 0,8 fois sa température de fusion), une bonne stabilité surfacique ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation. Les principaux métaux concernés sont le nickel, le cobalt et le fer et dans une moindre mesure le titane et l'aluminium, ainsi que des métaux d'addition : principalement chrome, mais aussi molybdène, niobium, tungstène, etc. Les superalliages trouvent leurs applications habituelles dans les turbines des moteurs d'avion (aubes de turbine des veines chaudes des turboréacteurs), les turbines à gaz, ou les turbines de l'industrie marine. Récemment, des applications médicales sont apparues avec la réalisation d'implants à base de superalliages.

Les intermétalliques se distinguent des alliages classiques par leur microstructure. En effet, contrairement aux alliages classiques dont la répartition des atomes de différentes natures est réalisée de manière aléatoire suivant les sites cristallographiques, les intermétalliques sont constitués d'une alternance périodique pour tous les atomes.

Ces types d'alliages sont principalement destinés aux marchés suivants : aéronautique, production d'énergie (matériaux constitutifs des turbines), stockage de l'hydrogène, construction navale, médical, usages en conditions sévères (industrie chimique, nucléaire).

3.5.3. Fonction(s) apportée(s) par le(s) métal (métaux) au niveau du produit final

En aéronautique, le principal enjeu pour les alliages se situe au niveau du moteur. Les pièces métalliques doivent avoir une densité aussi faible que possible et une bonne tenue au fluage⁵.

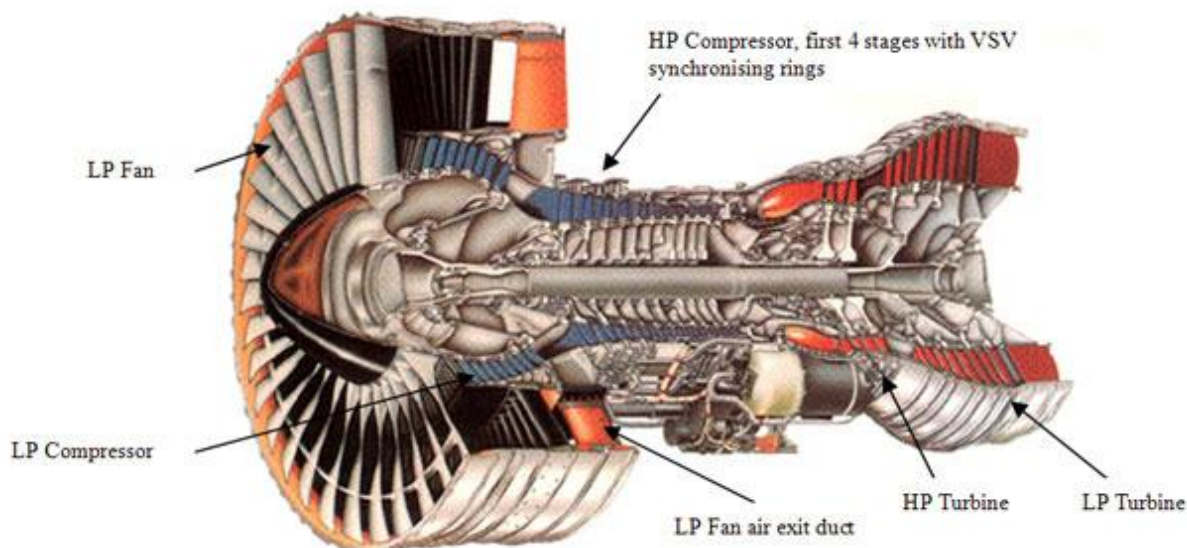
Le choix des matériaux s'est donc orienté vers :

- des alliages à hautes performances pour les pièces métalliques tournantes qui interagissent avec les gaz (avant ou après la chambre de combustion) : les superalliages à base de nickel, polycristallins pour les disques et monocristallins pour les aubes,

⁵ Déformation lente et irréversible d'un matériau soumis à une contrainte constante, inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Elle limite par exemple la durée de vie des aubes de turbine.

- des alliages nouveaux à faible densité, mais très réfractaires pour des pièces de carter : les composés intermétalliques.

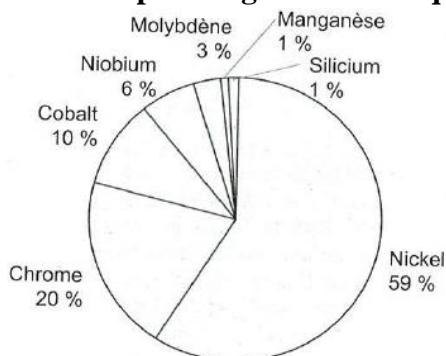
Figure 17 : Coupe du moteur Pratt & Whitney PW4000



Source : Pratt & Whitney, Australian Safety Investigations & Reports

On peut aussi mentionner les superalliages à base cobalt qui sont utilisés dans des applications de niche, essentiellement pour leur propriété de résistance à la corrosion pour l'industrie chimique et dans les usines de galvanisation (employés au contact du zinc liquide). Ces superalliages sont peu répandus car le cobalt est dix fois plus onéreux que le nickel.

Figure 18 : Composition moyenne des superalliages aéronautiques



Source : *Quel futur pour les métaux ?*, EDP Sciences, 2010

Les intermétalliques sont composés de liaisons métal-métal ou métal-semi-métal comme Ni_3Al (nickel-aluminium), $FeAl$ (fer-aluminium), $TiAl$ (titane-aluminium), $MoSi_2$ (molybdène-silicium), etc. Les aluminures et les siliciures sont les principaux matériaux intermétalliques et ont plusieurs applications ou sont prometteurs pour des applications futures. Ni_3Al est utilisé en aéronautique pour sa densité plus faible et sa forte résistance à l'oxydation. Il est également utilisé pour des matrices d'extrusion nécessitant une forte résistance mécanique ou pour la fabrication de tubes

utilisés pour le forage de pétrole pour sa très bonne résistance aux environnements agressifs soufrés. Le désavantage de cet alliage est la faible résistance au fluage. Les intermétalliques TiAl sont les plus prometteurs des aluminures pour les applications aéronautiques. Ils sont destinés à être utilisés pour les ailettes et les vannes des compresseurs haute pression des turbines.

3.5.4. Possibilités de substitution, solutions concurrentes

Aujourd'hui, la substitution des métaux pour les applications de haute performance n'est pas envisagée car aucun matériau ne semble approcher les propriétés atteintes par ces alliages. Des substitutions peuvent néanmoins s'opérer entre différents superalliages ou alliages intermétalliques.

Néanmoins, pour les prochaines décennies, les céramiques (de la même manière que les intermétalliques) pourraient gagner des parts de marché au détriment des superalliages. Ces matériaux présentent l'avantage d'être moins denses que les superalliages mais aujourd'hui ils sont trop fragiles pour pouvoir être utilisés pour les aubes des moteurs aéronautiques.

3.5.5. Quantités en jeu

Le nombre de moteurs et donc les besoins en pièces de moteurs vont augmenter car l'aéronautique civile a une perspective d'expansion très forte : le nombre d'avions va doubler d'ici 20 ans.

Pour un avion de type long-courrier de nouvelle génération (futur A 350 par exemple), les principaux besoins en métaux sont approximativement les suivants : 23 t d'aluminium, dont un tiers d'aluminium-lithium contenant entre 1,6 et 2 % de lithium ; 17 tonnes d'alliages de titane ; et 12 tonnes d'aciers et d'alliages spéciaux (éléments les plus utilisés dans ces alliages spéciaux : nickel, chrome, cobalt, niobium).

Selon les projections de marché pour la période d'ici à 2025, le besoin total et annuel des métaux pour la construction civile d'aéronefs ne représente au maximum que 1,5 à 2 % de la production mondiale 2008. Ces maxima (2 %) sont atteints pour certains métaux comme le cobalt, le vanadium et le niobium. Ainsi, même si le secteur aéronautique est consommateur de nombreux métaux, le nombre limité d'appareils manufacturés chaque année, en fait un secteur modeste dans la consommation totale de métaux, en comparaison avec l'automobile et la construction.

3.5.6. Impact sur le coût du produit final

La croissance importante du secteur aéronautique, conjuguée à la croissance de besoins nouveaux dans d'autres secteurs (automobile, énergies renouvelables, etc.) pourrait conduire à des tensions, pour le cobalt par exemple. Néanmoins, on peut anticiper que le secteur aéronautique, dans lequel la valeur ajoutée de recherche et développement est importante, et dont la part des matières premières est donc, en relatif, plus faible que dans d'autres secteurs, sera moins impacté.

Pour d'autres métaux, comme le rhénium, la question peut être sensible car 6 % de ce métal dans un superalliage peut représenter 80 % de son coût.

3.5.7. Possibilités de recyclage (en boucle fermée ou pour d'autres applications)

Deux sociétés françaises, Sorecfer et Aerometal, recyclent les superalliages.

Le programme PAMELA (Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft) est un projet d'Airbus, visant à aboutir à un recyclage de 85 à 90 % des composants d'un avion à l'horizon 2015. Ceci constituera, sans doute, une bonne filière pour la récupération de l'aluminium et du titane. Cependant, la possibilité de récupérer les éléments rares contenus dans les alliages spéciaux dépendra des résultats obtenus par le programme de recherche et de la rentabilité commerciale associée aux procédés de recyclage identifiés, alors que les normes propres au secteur aéronautique (notamment des contraintes fortes de pureté) ne favorisent pas nécessairement le recyclage.

3.5.8. Verrous

L'un des enjeux liés aux alliages à haute performance est l'amélioration des performances spécifiques rapportées à la densité dans une optique d'allègement des structures, très présente dans l'aéronautique. De plus, la reproductibilité des propriétés des alliages est un fort enjeu pour garantir la fiabilité des pièces. Pour cela, le contrôle de la microstructure est essentiel. Cela se traduit donc par le choix d'un procédé d'élaboration adéquat et pour lequel les mécanismes qui entrent en jeu sont bien compris. Enfin, l'augmentation de la durée de vie des pièces est un enjeu pour l'aéronautique civil.

Les turbines à gaz utilisées pour la génération d'énergie ont leurs propres exigences, mettant notamment en premier lieu la résistance des matériaux à la corrosion à chaud. Malgré ces différences, les mêmes bases d'alliage (métaux utilisés, traitements thermiques employés...) sont utilisées entre les deux applications, même si les compositions finales sont souvent légèrement différentes.

Il n'y a pas réellement de verrous technologiques majeurs pour les superalliages. L'innovation se fait de manière incrémentale. Les verrous se situent plutôt chez les concurrents des superalliages : les intermétalliques (TiAl). En effet, ces matériaux sont intéressants pour l'aéronautique car ils sont plus légers que les superalliages et présentent une grande résistance en température. Cependant, ils sont également très fragiles, ce qui rend leur utilisation peu courante pour les moteurs d'avion. Ces derniers subissant des chocs (en particulier avec les oiseaux), ils doivent être constitués de pièces résistantes. Néanmoins, de premières utilisations voient le jour : TiAl a été récemment employé pour les derniers étages des ailettes (*i.e.*, ceux qui n'entreront pas directement en contact avec l'oiseau).

Par ailleurs, une partie des recherches concernant les intermétalliques s'oriente vers de nouveaux matériaux comme ruthénium-aluminium qui peut être utilisé à des températures très élevées (point de fusion supérieur à 2000°C). Pour ce matériau, des recherches sont nécessaires pour optimiser son procédé de fabrication, sa composition et son traitement thermomécanique. Il est également nécessaire de déterminer le comportement élastique du matériau⁶.

Enfin, un nouveau type d'application pourrait voir le jour pour les intermétalliques : le stockage de l'hydrogène (matériaux dans lesquels l'hydrogène serait stocké). Mg₂Ni (magnésium-nickel) s'avère notamment être un bon candidat. Pour ces matériaux, un compromis entre capacité de

⁶ Source : *The European Technology Platform for Advanced Engineering Materials and Technologies*, Strategic Research Agenda, 2012

stockage de l'hydrogène par le matériau, cinétique de sorption et température d'utilisation est nécessaire⁷.

3.5.9. Principaux acteurs développant l'application

Parmi les grands acteurs des superalliages, nous pouvons citer les américains Haynes et ATI Allvac. Pour le moment, il n'y a pas d'acteurs asiatiques présents sur ce marché mais les spécialistes du secteur prédisent qu'ils vont y faire leur apparition d'ici quelques années. Ainsi, la production chinoise est actuellement modeste, mais le gouvernement soutient le développement d'une offre nationale d'alliages de ce type.

Au niveau international, on peut citer le National Institute for Materials Science (NIMS) et le National Research Institute for Metals (NRIM) au Japon, ainsi que le NASA Glenn Research Center et l'Air Force Research Lab aux Etats-Unis.

En France, Aubert & Duval, filiale d'ERAMET, a réalisé 690 M€ de chiffre d'affaires en 2011 dont 31 % en lien avec la vente de superalliages, dont elle est le principal spécialiste français. Aperam, à travers sa filiale Aperam Alloys Imphy, est également fournisseur de superalliages, en particulier pour le secteur nucléaire.

Plusieurs centres de compétences français sont actifs dans ce domaine :

- L'ONERA (Office National d'études et de recherches aérospatiales, France), avec la conception et fabrication de superalliages (parmi les projets recensés auxquels l'ONERA a participé : Modélisation électrochimique du comportement des phases intermétalliques dans les alliages d'aluminium ; Fabrication d'intermétalliques par arc plasma) ;
- Le CIRIMAT (Université de Toulouse), sur la mise au point de superalliages ;
- Le Centre des Matériaux, Mines ParisTech, sur les superalliages à base de nickel pour l'aéronautique (parmi les projets recensés auxquels les Mines ParisTech ont participé : Fluorotournage de titane à froid ; Fabrication d'intermétalliques par arc plasma ; Comportement mécanique et tribologique des composites à matrice titane) ;
- L'ICMPE (Institut de Chimie et des Matériaux Paris Est), sur les phases intermétalliques et les matériaux hautes performances ;
- L'IRT M2P (Matériaux Métallurgie et Procédés).

3.5.10. Perspectives

Le contexte relatif aux alliages hautes performances est a priori favorable : la demande est tirée par quelques secteurs majeurs tels que l'aéronautique ou le nucléaire, des relations étroites lient les grands donneurs d'ordre et les industriels métallurgistes (Aubert & Duval, Aperam, UKAD - filiale commune entre Aubert & Duval et le groupe kazakh UKTPMP), et de nouvelles applications émergent. Par ailleurs, la France a su conserver des compétences en métallurgie appliquée à ce type d'alliages, même si ces dernières ont eu tendance à s'éroder ces dernières années.

⁷ Source : idem

L'enjeu est double :

- d'une part, rester compétitif sur les superalliages, pour répondre aux besoins d'amélioration des performances pour les applications existantes, mais aussi pour conserver une certaine avance par rapport aux offres qui émergent dans des pays tels que la Chine ;
- d'autre part, accompagner le développement de l'utilisation des alliages de titane, en particulier les nouvelles applications en aéronautique.

La recherche et l'innovation porte sur les alliages eux-mêmes et les procédés de transformation, notamment la forge et la fonderie, ainsi que les procédés émergents (voir à ce sujet le chapitre consacré à métallurgie des poudres) ; un savoir-faire est à acquérir pour le travail des nouveaux alliages, la sous-traitance mécanique de ces secteurs est donc directement concernée.

Un des principaux enjeux réside probablement dans le renforcement des relations entre les différents acteurs, depuis les centres de compétences jusqu'aux sous-traitants spécialisés et aux donneurs d'ordre, en passant bien entendu par les entreprises métallurgiques, et en y incluant les métiers émergents du recyclage, l'objectif étant de pouvoir continuer à rivaliser avec les offres faisant référence (exemple américain) ou en voie d'émergence (exemple chinois).

3.6. Conducteurs pour les câbles électriques

3.6.1. Périmètre et enjeux

Cette étude concerne l'utilisation de métaux et d'alliages à base de cuivre et d'aluminium pour des applications dans les câbles électriques destinés à être intégrés dans les réseaux stationnaires ou dans les réseaux embarqués.

La consommation mondiale d'électricité augmente de 2,4 % par an, allant jusqu'à 3,7 % en Asie. Pourtant, 1,6 milliards de personnes dans le monde n'ont toujours pas accès à l'électricité et ce chiffre pourrait atteindre 2 milliards à l'horizon 2020 (source : Nexans). La demande en nouvelles installations des pays en voie de développement est accompagnée d'une restructuration des réseaux des pays développés qui recherchent l'intégration des réseaux, souvent à l'échelle continentale.

De plus, la croissance des marchés de l'automobile (3 % par an jusqu'en 2020 pour les pays de l'OCDE et 9 % par an pour les BRIICS (Brésil, Russie, Inde, Indonésie, Chine, Afrique du Sud)⁸) et de l'aéronautique (doublement de la flotte d'avions d'ici 20 ans annoncé par tous les constructeurs) accélère la demande en câbles pour les réseaux embarqués.

3.6.2. Description

Pour les applications stationnaires, on distingue différents types de câbles : aériens, souterrains ou sous-marins.

Un câble est généralement composé de la manière suivante :

- un composé conducteur électrique au centre,
- puis une isolation électrique pour empêcher le courant de s'écouler vers la terre,
- puis une gaine électrique permettant de confiner le champ électrique à l'intérieur du câble,
- et enfin une protection extérieure qui assure la tenue mécanique du câble.

Figure 19 : Photographie d'un câble montrant les différentes couches qui le constituent



Source : fiche technique NEXANS du produit IEC 60502-2 / NF C 33-220 12/20 (24) kV

⁸ OCDE (2013), « Industrie automobile : ajustements à moyen terme des capacités de production », Notes de politique économique du Département des affaires économiques de l'OCDE, No.21 novembre 2013

3.6.3. Fonction(s) apportée(s) par le(s) métal (métaux) au niveau du produit final

Pour l'application des câbles électriques, le cuivre et l'aluminium sont avant tout sélectionnés pour leur propriété de conductivité électrique.

Une caractéristique essentielle que les matériaux doivent posséder est l'aptitude au filage. De bonnes propriétés mécaniques sont également nécessaires en fonction de l'application visée. Par exemple, une bonne résistance mécanique est nécessaire pour les câbles qui passent par les portes des véhicules automobiles et doivent résister aux nombreuses ouvertures et fermetures de la portière. Il en va de même pour les câbles haute tension qui risqueraient de rompre sous leur propre poids si la résistance mécanique du métal n'était pas suffisante.

3.6.4. Possibilités de substitution, solutions concurrentes

Le cuivre et l'aluminium sont les seuls métaux et même quasiment les seuls matériaux utilisés comme conducteurs dans les câbles conducteurs. L'argent et l'or pourraient techniquement être utilisés mais ne le sont pas pour des raisons évidentes de coût.

Si le cuivre et l'aluminium sont concurrents en matière de câbles, ils ne sont pas tout à fait substituables. Le cuivre est le métal utilisé historiquement pour les câbles électriques. Cependant, la hausse du cours du cuivre observée ces dernières années (d'environ 4000 €/t en 2009 à 6000 €/t en 2012), supérieure à celle de l'aluminium (1300 €/t à 1600 €/t sur la même période), pousse les industriels à envisager la substitution du cuivre par l'aluminium. Or, l'aluminium est moins conducteur que le cuivre et doit être utilisé en plus grande quantité : pour une conduction identique, les câbles d'aluminium doivent avoir une section 60 % plus importante que ceux de cuivre. Ainsi, lorsque ce facteur est pris en compte, les coûts de matière première sont réduits de 50-60 % lorsque l'aluminium est utilisé à la place du cuivre.

Malgré l'avantage en termes de coût, l'aluminium présente certains inconvénients. Tout d'abord, le fait que les câbles d'aluminium soient plus volumineux les rend moins faciles à utiliser lorsque l'espace est restreint. Cela pourrait par exemple être problématique dans le cas des systèmes embarqués. Néanmoins, l'aluminium est 35 % plus léger que le cuivre⁹. De plus, l'aluminium étant plus rigide que le cuivre, ce dernier reste le premier choix pour des applications où une connexion flexible est nécessaire.

Pour conclure, bien que l'aluminium soit beaucoup moins cher que le cuivre, son utilisation est plus complexe et des coûts additionnels sont généralement à prévoir pour se procurer les terminaux adaptés. Pour l'alimentation en électricité des réseaux où des câbles de petite section sont nécessaires, le cuivre est le plus souvent la solution avec le meilleur rapport qualité-prix mais pour l'alimentation en haute tension où des câbles de grande section sont utilisés, l'aluminium peut offrir un gain de coût.

Face à ces options qui constituent l'état de l'art actuel, certaines solutions s'inscrivent en rupture. Ainsi, les câbles supraconducteurs, dont les premières industrialisations (installation d'un câble de première génération dans la ville d'Essen) sont réalisées aujourd'hui, auront leur place dans le paysage futur des câbles électriques. A plus long terme, quand le prix du ruban supraconducteur

⁹ Les chiffres de ces trois derniers paragraphes sont donnés par Siemens.

aura baissé, Nexans vise les liaisons de grande distance en haute tension. Les matériaux supraconducteurs sont des céramiques, souvent intégrées dans des matrices d'argent. Pour le cas d'Essen, Nexans avait le choix entre un câble en cuivre de 110 kV, et un faisceau de câbles en aluminium de 10 kV (de section plus importante). Ainsi le câble supraconducteur est plus compact que le câble en aluminium et même s'il est plus cher que le câble en cuivre, il évite l'ajout d'un transformateur 110/10 kV. Par ailleurs, dans les applications industrielles très consommatrices d'électricité, comme l'électrolyse, des câbles à base de MgB_2 (diborure de magnésium), matériau supraconducteur qui a l'avantage d'être moins cher, pourraient se substituer aux systèmes traditionnels. Il faut toutefois souligner que tout câble supraconducteur a une gaine multicouche de refroidissement qui est d'une épaisseur conséquente, et complexe à mettre en œuvre ; de ce fait, les rayons de courbure accessibles à ces câbles sont limités, problématique que ne rencontrent pas l'aluminium ou le cuivre.

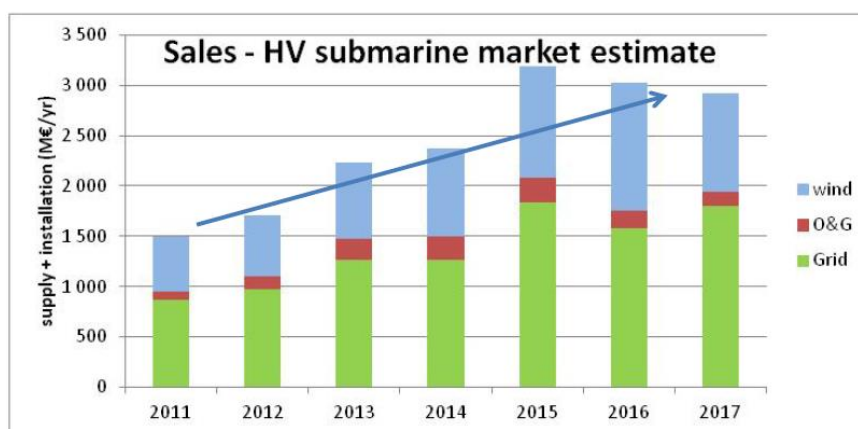
3.6.5. Quantités en jeu

Les câbles représentent environ un tiers de la consommation de cuivre mondiale, soit de l'ordre de 6 Mt/an. *Nota : l'analyse des places respectives de l'aluminium et du cuivre sera abordée plus en détail dans le cadre de la phase 4 de la présente étude, consacrée aux scénarios prospectifs.*

Une forte croissance est attendue sur le marché des câbles sous-marins. Cela est notamment dû à une demande croissante de l'interconnexion des réseaux européens, à un réseau d'éoliennes off-shore se déployant et se situant de plus en plus loin de la côte ainsi qu'à une croissance de la demande des plateformes pétrolières en connexions haute tension.

En 2010, Nexans a réalisé plus de 65 % (soit 4 milliards d'euros environ) de son chiffre d'affaires grâce à la vente de câbles, solutions de câblage et de services pour l'application de transport d'électricité et de câbles électriques à destination de l'industrie.

Figure 20 : Estimation des ventes de Nexans sur le marché des câbles sous-marins haute tension



Source : Nexans

3.6.6. Impact sur le coût du produit final

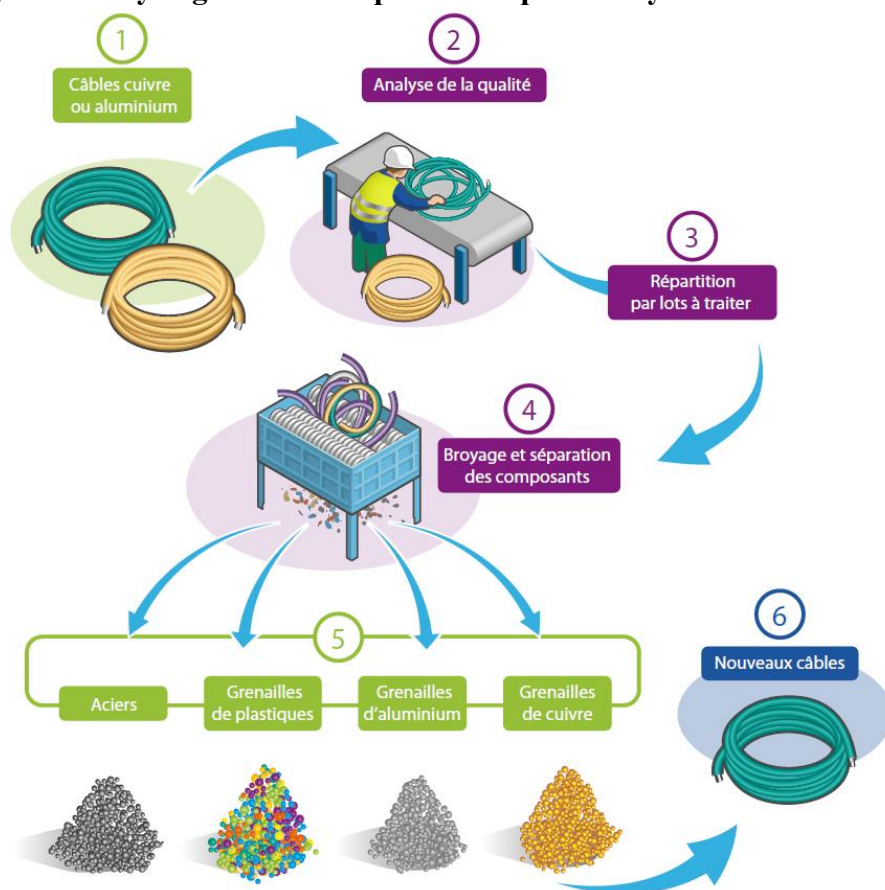
Le coût du cuivre représente 60 à 70 % du coût des câbles électriques. Pour cette raison, la hausse du cours du métal de ces dernières années a eu un fort impact sur le coût des câbles. C'est l'une des principales raisons qui pousse les industriels à se déporter vers l'aluminium.

3.6.7. Possibilités de recyclage (en boucle fermée ou pour d'autres applications)

Le cuivre et l'aluminium des câbles sont recyclables. Le recyclage est réalisable en boucle fermée, comme cela est schématisé à la Figure 21.

Recycâbles est une co-entreprise entre Nexans et Sita (groupe Suez Environnement). Selon Nexans, Recycâbles est leader européen sur son marché. Nexans a ainsi recyclé en 2011, via Recycâbles, 15 371 tonnes de déchets de fabrication de câbles issus de ses sites européens et africains et plusieurs milliers de tonnes de câbles en fin de vie collectés chez ses clients.

Figure 21 : Cycle de recyclage des câbles par l'entreprise Recycâbles



Source : fiche process SITA, disponible sur la page de recyclage des métaux ferreux, non ferreux et câbles

3.6.8. Verrous

Les grands enjeux technologiques à venir concernant les câbles proviennent du développement de l'HVDC (High Voltage Direct Current – transmission haute tension en courant continu), technologie destinée à être notamment utilisée pour connecter les éoliennes off-shore. Les câbles

HVDC permettent d'utiliser deux plutôt que trois câbles conducteurs pour supporter le même courant et subissent moins de pertes électriques sur les longues distances, sachant par ailleurs que le courant alternatif n'est pas utilisable dans le cas d'une liaison sous-marine. Bien que le principe du transport de l'électricité par courant continu soit connu de longue date, le marché de la transmission HVDC, évalué globalement à 2,5 Md\$ par an actuellement, devrait, selon Siemens, doubler dans les cinq ans à venir, notamment pour répondre aux besoins d'interconnexions grande distance (entre pays européens, ou dans des pays ayant un territoire étendu : Chine, Inde et Brésil en particulier).

Pour l'aluminium, l'un des principaux enjeux est d'augmenter la résistance mécanique afin que les câbles électriques des réseaux fixes puissent supporter leur propre poids et que les câbles destinés aux réseaux embarqués puissent être utilisés dans des endroits plus confinés comme les habitacles automobiles. Une bonne résistance mécanique est également nécessaire pour les câbles situés dans les portières car les câbles doivent résister aux nombreuses ouvertures et fermetures de ces dernières.

3.6.9. Principaux acteurs développant l'application

Le français Nexans est un des trois grands acteurs mondiaux du secteur des câbles. Son site français concerné par le périmètre de cette étude est celui de Lens, qui possède une activité métallurgique.

Les deux principaux concurrents de Nexans (7,2 Md€ de CA en 2012) sont l'italien Prysmian (7,8 Md€ de CA en 2012) et l'américain General Cables (4,6 Md€ en 2012). Hormis ces trois principaux, nous pouvons citer aussi le japonais Sumitomo (3,2 Md€ de CA en 2012) et le Coréen LS Cable (2,6 Md€ de CA en 2012).

3.6.10. Perspectives

L'activité en matière de câbles est principalement tirée par les besoins des grands réseaux électriques, aussi bien dans les pays développés (renforcement des interconnexions, modernisation) que dans les pays émergents, et les besoins des applications embarquées, pour l'automobile et l'aéronautique en particulier. Dans ce domaine, le cuivre et l'aluminium restent les matériaux de référence ; ces deux métaux sont plus ou moins en concurrence, leurs domaines d'application prioritaires respectifs ayant toutefois probablement vocation à se stabiliser d'ici quelques années.

En France, ce secteur est caractérisé par la présence d'un grand groupe d'envergure internationale, Nexans, et d'un ensemble de fournisseurs plus ou moins spécialisés sur certaines applications. Parmi ces acteurs, seul Nexans a conservé des compétences significatives en métallurgie. L'industrie du câble dans son ensemble emploie plus de 9 000 personnes en France, avec plus de 45 sites de production, mais il subsiste un seul producteur français de fil machine en aluminium de qualité électrique, le site Trimet de Saint-Jean de Maurienne.

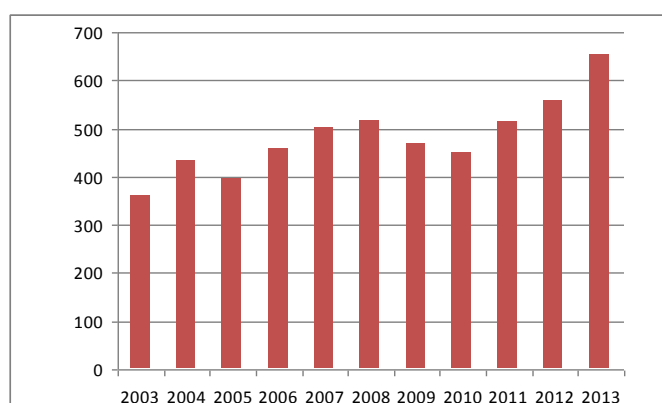
D'un point de vue R&D, les projets les plus visibles portent principalement sur de nouveaux types de matériaux (recours aux nanomatériaux, aux supraconducteurs, etc.), qui ne relèvent pas nécessairement du domaine de la métallurgie stricto-sensu, et s'inscrivent en rupture par rapport aux technologies actuelles. Il subsiste toutefois des besoins ciblés, concernant aussi bien les réseaux fixes que les réseaux embarqués (automobile, aéronautique), qui nécessitent en particulier la mise au point d'alliages adaptés. Pour y répondre, il convient d'assurer un maintien effectif de compétences en matière de métallurgie appliquée aux conducteurs électriques.

4. ANALYSE DE LA POSITION FRANÇAISE DU POINT DE VUE RECHERCHE ET INNOVATION

4.1. La position française du point de vue des brevets

Une première indication de la position française dans le domaine des métaux non ferreux peut être obtenue grâce aux publications de brevets, en particulier de brevets européens (au sens de demandes déposées auprès de l'Office Européen des Brevets). Le système de classification permet de faire ressortir ce qui concerne plus spécifiquement l'élaboration de métaux non ferreux (y compris le recyclage) et de leurs alliages¹⁰.

Graphique 5 : Publications de demandes de brevet européens relatifs aux métaux non ferreux



Source : OEB, traitement Erdyn¹¹

Sur la période 2003-2013, on constate globalement une croissance de l'activité en matière de brevets, le ralentissement de l'activité économique en 2008 se traduisant néanmoins par un creux au niveau des publications de demandes de brevet en 2010. La tendance est toutefois repartie à la hausse.

L'analyse selon la nationalité des déposants fait ressortir plusieurs tendances :

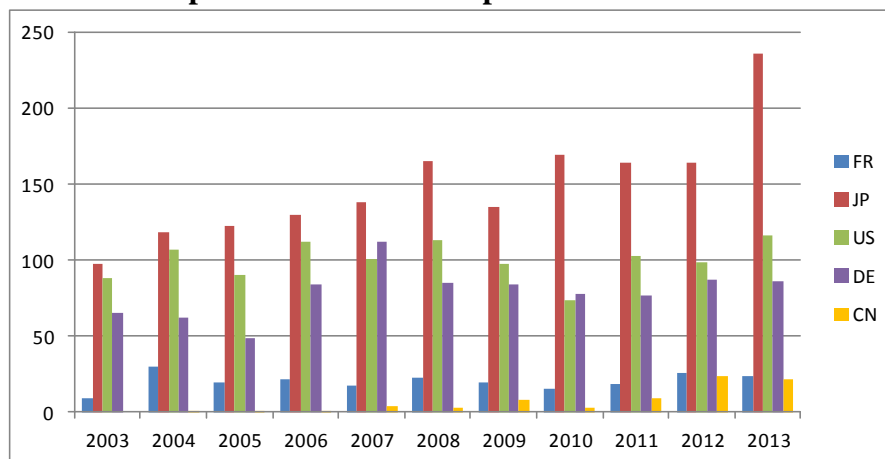
- Cet indicateur fait apparaître une prédominance de plus en plus forte du Japon : les acteurs japonais étaient présents dans 29 % des demandes sur la période 2003-2008, cette proportion atteint quasiment 33 % sur la période 2009-2013 ;
- Les deux autres grands pays leaders dans ce domaine – Etats-Unis et Allemagne – maintiennent à peu près leur position en volume, leur position relative étant donc en régression ;
- Cette tendance est aussi celle de la France : les acteurs français étaient présents dans 4,5 % des demandes sur la période 2003-2008, cette proportion passe sous la barre des 4% sur la période 2009-2013 ; à titre de comparaison, la part moyenne de la France dans les brevets européens, tous domaines confondus, est de l'ordre de 6 % ;

¹⁰ Cet exercice ne peut être étendu à la première transformation (laminage, extrusion...), qui apparaît dans le système de classification sous l'angle du procédé, donc de façon non spécifique au type de matériau métallique transformé.

¹¹ Le référentiel utilisé ici est celui des demandes de brevet déposées auprès de l'OEB (Office Européen des Brevets), communément utilisé pour la production d'indicateurs. Les classes de brevets retenues ici sont les classes C22B (production et affinage et métaux), C22C1 à 28 (alliages non ferreux) et C22F (traitements thermiques, etc., des non ferreux et leurs alliages).

- Quasiment absente au début des années 2000, la Chine monte progressivement en puissance, et occupe désormais, sur la base de cet indicateur, une place comparable à celle de la France.

Graphique 6 : Publications par nationalité des déposants



Source : OEB, traitement Erdyn ; comptage de présence, ne tenant pas compte du fait qu'une même demande peut être déposée par plusieurs co-déposants

Concernant les déposants français (du moins, ceux inclus dans le périmètre de la présente étude), sur la période 2009-2013 :

- Parmi les entreprises, les premiers déposants sont Constellium France (14 demandes) et Alcan Rhenalu (7 demandes), auxquels il convient d'ajouter Rio Tinto Alcan (plus d'une dizaine de demandes, en comptant les brevets des filiales ECL et Carbone Savoie, ainsi que ceux déposés au nom du siège canadien, mais avec des inventeurs français) ; on trouve ensuite des entreprises telles que Aubert & Duval, Montupet ou ERAMET ;
- Côté recherche publique, les deux premiers déposants sont le CEA (13 demandes) et le CNRS (9 demandes).

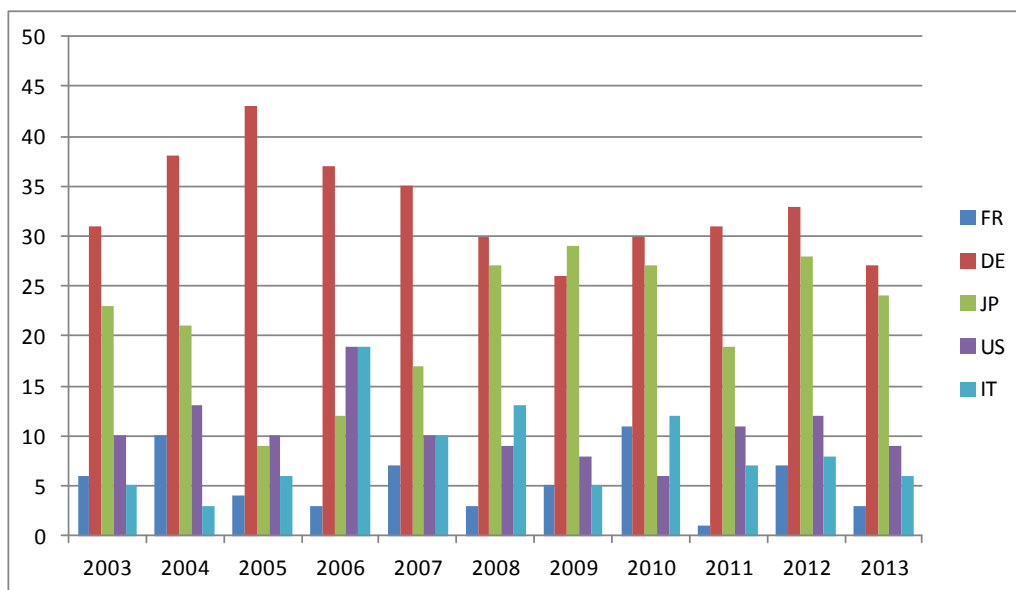
D'autres acteurs industriels majeurs apparaissent également parmi les principaux déposants, mais n'appartiennent pas au périmètre retenu, car se situant plus en aval de la chaîne de valeur : c'est le cas de SNECMA (groupe SAFRAN), et, dans une moindre mesure, de PSA ; on peut citer également la présence d'AREVA, aussi bien pour l'activité réacteurs (AREVA NP) que pour l'activité combustibles (AREVA NC).

S'agissant de la première transformation des métaux, le système de classification des brevets ne permet pas de faire une distinction entre métaux ferreux et non ferreux. Par défaut, l'analyse des publications de brevets européens dans ce domaine¹² donne néanmoins une indication indirecte sur les évolutions sur la période 2003-2013 et sur la répartition géographique des déposants (cf. graphique 5).

On observe ainsi une moyenne d'une centaine de brevets par an, stable sur cette période. La part des déposants français est de l'ordre de 5 %. Il s'agit d'un domaine largement dominé par les déposants allemands (32 %) et japonais (21 %), suivis par les américains (10 %) et les italiens (8 %). Depuis 2008, les positions allemande et japonaise ont eu tendance à s'équilibrer.

¹² Classe B21C, portant sur la fabrication de feuilles, de fils, de tubes ou de profilés par transformation mécanique du métal. Cette classe concerne le procédé en lui-même, indépendamment du secteur utilisateur du produit ainsi transformé.

Graphique 7 : Publications de demandes de brevet européens relatifs à la première transformation des métaux



Source : OEB, traitement Erdyn ; comptage de présence, ne tenant pas compte du fait qu'une même demande peut être déposée par plusieurs co-déposants

Il ne faut bien entendu pas sur-interpréter ces résultats, ces données portant sur un périmètre incluant à la fois l'acier et les non ferreux. Il apparaît néanmoins qu'ici aussi, la position française est en retrait, face à la forte prédominance des positions allemande et japonaise.

4.2. L'implication des acteurs français dans les projets collaboratifs

Les données relatives aux projets collaboratifs bénéficiant d'un cofinancement public apportent des indications sur les activités en matière de recherche et d'innovation menées par les différents acteurs français. Dans le cadre de la présente étude, un panel de 52 projets collaboratifs, se répartissant principalement sur la période 2008-2013, a été constitué à travers l'exploitation systématique des données disponibles. Ce recensement permet de faire ressortir quelques grandes tendances, mais ne prétend pas être exhaustif¹³. En particulier, la production de métal primaire apparaît peu dans les projets collaboratifs (alors que des budgets de R&D élevés lui sont consacrés), du fait de la stratégie des acteurs de maîtrise de toute la chaîne de valeur de l'innovation.

L'ANR arrive nettement en tête des financeurs, avec 33 projets identifiés les 120-150 des appels à projets chimie durable, matériaux et stockage de l'énergie (voir le détail des modalités de recensement en Annexe 3 : liste des projets recensés) ; on dénombre également une douzaine de projets européens (PCRD) avec participation française. Les projets financés par le FUI (Fonds Unique Interministériel, dédié aux projets accompagnés par les pôles de compétitivité) sont au nombre de 6 ; enfin, un seul projet de type « AMI », géré par l'ADEME, a été identifié.

¹³ L'ANR, la DGCIS et la DATAR (pour les projets dits « FUI ») ne diffusent pas systématiquement les informations relatives aux projets financés ; pour cette raison, il n'est pas possible de garantir l'exhaustivité des projets recensés dans le cadre de la présente étude, et a fortiori de bâtir des indicateurs à partir des données disponibles. De la même façon, BPI France ne diffuse que peu d'informations sur les projets que cet établissement finance, qui n'ont donc pas été inclus dans le périmètre de la présente étude.

D'un point de vue thématique, ces projets peuvent être rattachés à trois domaines principaux :

- Le secteur de l'énergie arrive en tête, avec 18 projets recensés, dont 12 sur le seul thème du stockage électrochimique (la majorité concernant les batteries au lithium) ; le photovoltaïque est également bien représenté, avec 3 projets ;
- Le secteur aéronautique est concerné par un total de 11 projets ; 6 projets concernent les alliages de titane 3 concernent des procédés dont 1 sur la fabrication additive ;
- Enfin, le recyclage fait l'objet de 7 projets ; on peut noter au passage que 2 d'entre eux concernent en fait des métaux et alliages du secteur aéronautique.

Au total, ces trois grands domaines représentent environ 70 % des projets identifiés. D'autres thèmes sont également présents, mais n'apparaissent qu'au travers d'un ou deux projets, par exemple : fonderie d'alliages d'aluminium pour le secteur automobile, alliages de titane biocompatibles, production d'aluminium primaire par électrolyse, etc.¹⁴

De nouveaux instruments sont apparus dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir (PIA). Dans le cas présent, plusieurs projets lauréats peuvent être reliés au thème des métaux non ferreux :

- S'agissant des instruments avant tout destinés au monde académique, on dénombre 5 Laboratoires d'Excellence (Ressources21, Storex, DAMAS, ICOME2, CEMAM) qui abordent notamment le thème des ressources métalliques, celui du stockage de l'énergie, ou bien encore des alliages métalliques pour l'allègement des structures ; 2 Equipements d'Excellence (MatMéca, EcoX) sont également à noter, respectivement dédiés à la métallurgie des poudres et à l'étude de la réactivité des métaux dans leur environnement.
- D'autres instruments ont pour vocation de favoriser les collaborations entre recherche et industrie. Dans le cas présent, on peut identifier 3 Instituts de Recherche Technologique (IRT Jules Verne, Saint Exupéry et M2P, respectivement associés aux pôles EMC2, Aerospace Valley et Materalialia), ainsi que 2 Institut de la Transition Energétique (Supergrid, associé au pôle Tenerrdis, et l'Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France) ; 2 plateformes d'innovation (PFI) peuvent également être citées : STEEVE, dédiée aux batteries, ainsi qu'Axel'One, associée au pôle Axelera.

Pour ces différents types de projets (ANR, FUI, PIA, etc.), les pôles de compétitivité jouent un rôle de labellisation et éventuellement d'accompagnement au montage. Parmi les différents projets recensés dans le cas présent, on identifie ainsi 9 pôles :

- Tout d'abord, 3 pôles « sectoriels » : Aerospace Valley (aéronautique), Pôle Nucléaire Bourgogne (industrie nucléaire) et Tenerrdis (énergies) ;
- Par ailleurs, 6 pôles à caractère « transversal » : EMC2, Materalialia (ces 2 pôles ayant un positionnement « matériaux », avec une forte composante « métallurgie » dans le cas de Materalialia), ViaMéca, TEAM2, Trimatec et Axelera, ces 3 derniers apparaissant à travers le thème du recyclage. Axelera est également significativement présent sur les aspects procédés en général.

¹⁴ Les projets auxquels participent l'industrie des métaux non ferreux sont plus nombreux que ceux détaillés ici. Outre le fait, comme mentionné précédemment, qu'il n'existe pas de source exhaustive des projets financés, les projets transversaux à plusieurs secteurs industriels, sur des thèmes d'intérêt commun, et auxquels participe au moins un acteur de l'industrie des métaux non ferreux, n'ont pas été inclus dans le périmètre.

On peut noter que certains projets font l'objet de colabellisations, typiquement entre un pôle « sectoriel » et un pôle « transversal », par exemple : Axelera et Tenerrdis (tout deux principalement implantés en région Rhône-Alpes), ou EMC2 et PNB.

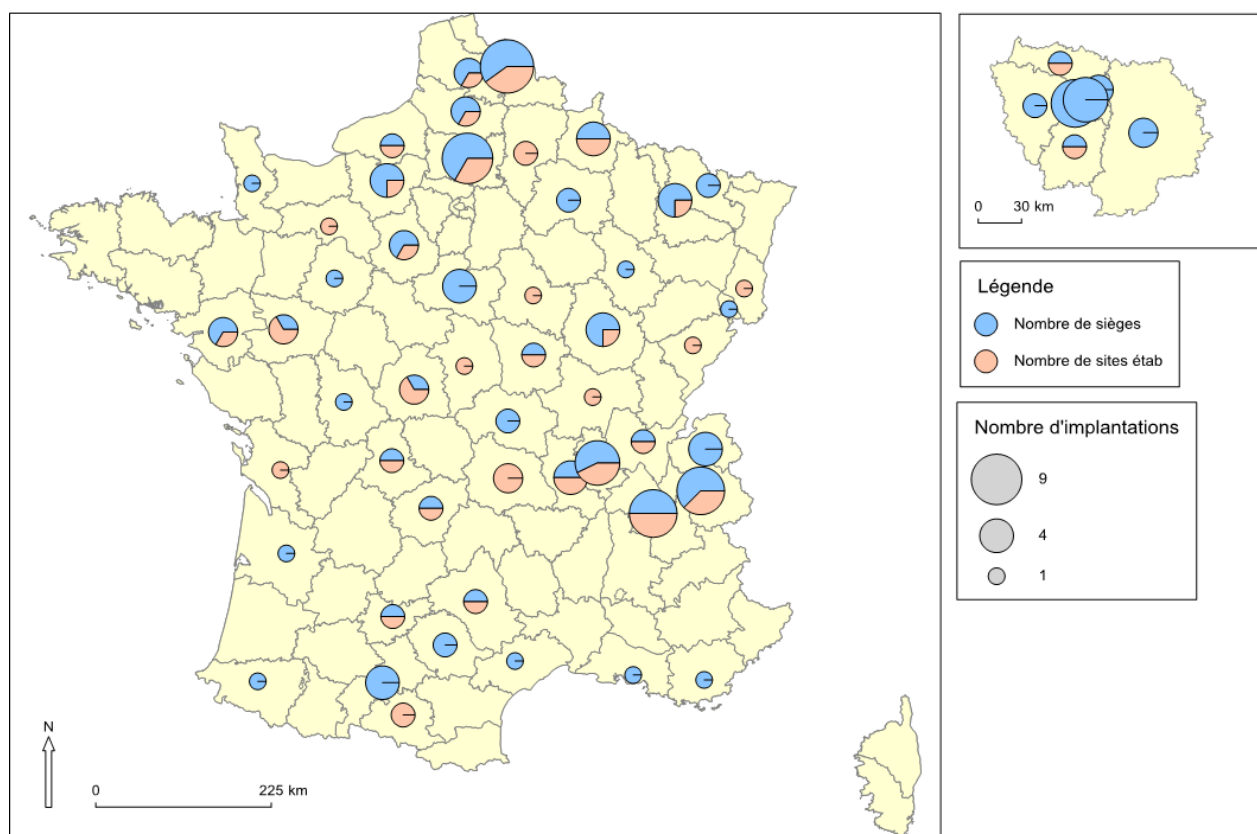
4.3. La répartition territoriale des acteurs

L'identification des différents acteurs, qu'il s'agisse des entreprises (sur la base du recensement effectué dans le cadre du premier volet de la présente étude), des acteurs de la recherche ainsi que des différentes structures ayant vocation à susciter des collaborations (depuis les pôles de compétitivité jusqu'aux nouveaux instruments introduits par le PIA) permet d'aborder le secteur des métaux non ferreux sous l'angle territorial¹⁵.

La répartition des entreprises peut être abordée sous l'angle de l'implantation des sites (sièges et établissements) ou bien des effectifs ; dans ce dernier cas, seuls les effectifs des sièges sont comptabilisés¹⁶.

Figure 22 : Répartition des implantations des entreprises, par département (sièges – en bleu – et établissements)

Localisation des sièges et établissements des sites industriels de la métallurgie des non ferreux

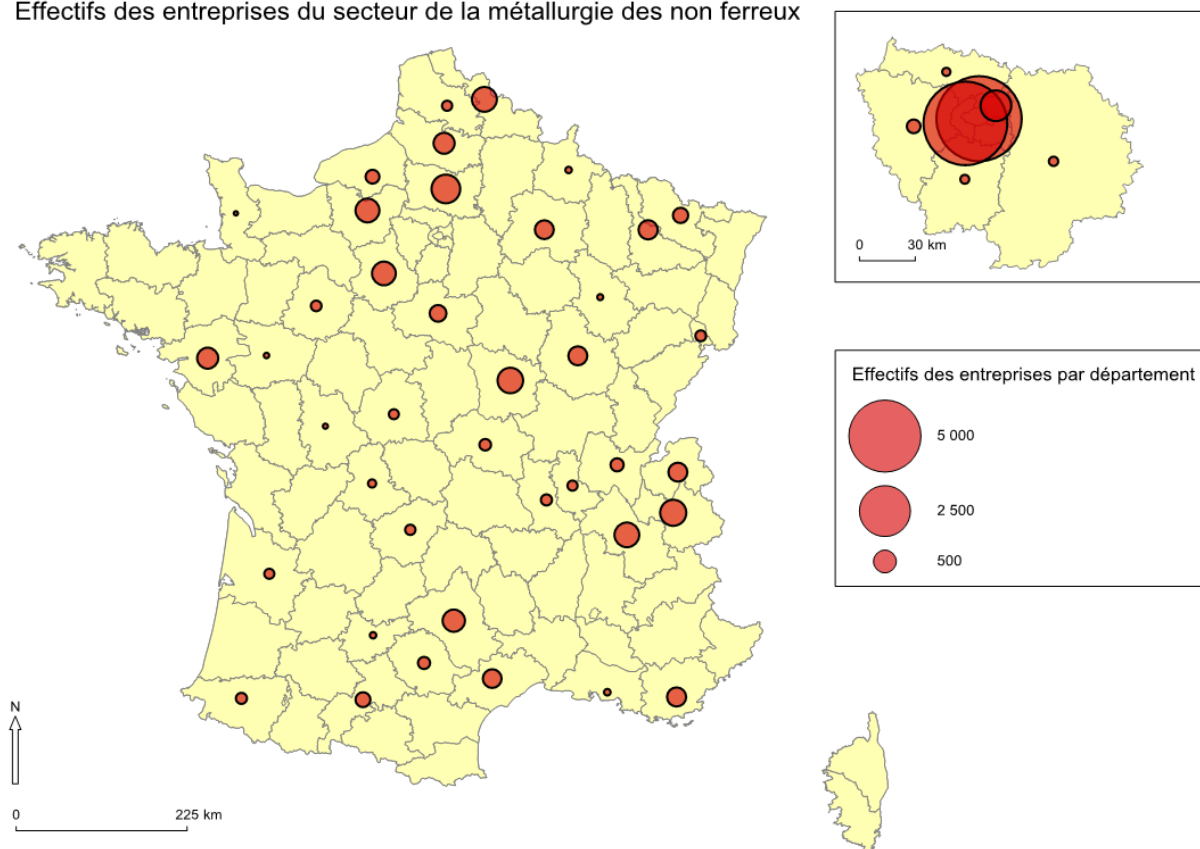


¹⁵ L'analyse est ici centrée sur la France métropolitaine.

¹⁶ Le rapport du volet présente une répartition des emplois par région sur la base des données de Pôle Emploi, qui ne sont pas du même type. Par exemple, ces données font apparaître un poids important de ce secteur en Alsace ; ceci est en le résultat de la présence d'un établissement de Constellium, qui représente à lui seul 1 400 personnes, mais dont le siège se situe en Ile-de-France.

Figure 23 : Répartition des effectifs par entreprise (sièges uniquement)

Effectifs des entreprises du secteur de la métallurgie des non ferreux



Quelques régions-clés émergent, à la fois du point de vue du nombre d'implantations et des effectifs : Nord-Pas-de-Calais, Picardie et Rhône-Alpes, principalement. La région Champagne-Ardenne présente une certaine concentration de sites, mais il s'agit principalement soit de PME, soit d'établissements dont le siège se situe en-dehors de la région. Par ailleurs, la région Ile-de-France bénéficie de l'implantation de nombreux sièges.

Certaines de ces entreprises se distinguent par le fait qu'elles disposent en interne de sites dédiés à la R&D :

- **ERAMET** possède un centre de R&D situé à Trappes, constitué en filiale du groupe, sous le nom d'ERAMET Research (effectifs de la société : 137 personnes). Autre spécificité, le groupe possède également une filiale dédiée à l'ingénierie (ERAMET Ingénierie) ; par ailleurs, d'autres sociétés du groupe possèdent leurs propres équipes de R&D, notamment Aubert & Duval et Eurotungstène.
- **Constellium** possède un important centre de R&D en région Rhône-Alpes, le Constellium Technology Center, également constitué en filiale du groupe (Constellium C-TEC, dont le siège est à Paris ; effectifs : 266 personnes). Il s'agit du plus grand centre de compétences industriel français de la filière aluminium.
- Enfin, le groupe **Rio Tinto Alcan** possède à Saint-Jean-de-Maurienne un centre de R&D dédié aux procédés de production de l'aluminium, le LRF (Laboratoire de Recherche et de Fabrication), avec une centaine de personnes.

Le C-TEC et le LRF sont issus de l'ex-groupe Pechiney, et sont considérés comme des centres de compétences de niveau mondial sur l'aluminium.

Le LRF est, depuis plus d'une trentaine d'années, un des principaux laboratoires dans le domaine du développement des moyens de production d'aluminium primaire. Son haut niveau d'expertise et l'excellence des innovations qui y sont mises au point lui ont permis d'acquérir un rayonnement international : de fait, pendant 35 ans, plus de 80% de la production mondiale d'aluminium a été faite sous licence de brevets basés sur des résultats issus du LRF.

Cette dynamique se poursuit. La technologie « AP60 » a récemment été mise au point au sein du LRF et constitue un axe majeur de développement du groupe RTA ; la technologie d'électrolyse de nouvelle génération à l'horizon 2016-2018 (« APXe ») est en cours de développement en France et les projets futurs, au-delà de celle-ci, sont d'ores et déjà en cours de réflexion.

Quelques entreprises possèdent un savoir-faire très spécifique, comme dans le cas de Cezus, qui maintient des activités dédiées au zirconium sur son site d'Ugine ; on peut citer également le cas de Nexans, qui possède des compétences en métallurgie du cuivre et de l'aluminium sur son site de Lens, en relation avec ses domaines d'application. Inversement, plusieurs compétences ont disparu ou ont été transférées hors de France : transformation du cuivre chez KME, élaboration et transformation du titane chez Cezus, feuilles minces d'aluminium chez Novelis, etc.

Concernant la première transformation, outre Constellium, qui possède au sein de son centre de R&D une équipe dédiée à l'extrusion de l'aluminium, on peut citer l'exemple de SAPA (transformation de l'aluminium), groupe qui s'est organisé autour d'un réseau de « Centres d'innovation » répartis dans plusieurs pays – son principal centre de R&D étant par ailleurs implanté en Suède. Un groupe tel que KME (transformation du cuivre), présent en France, possède des centres de R&D en Allemagne et en Italie. Outre ces grands acteurs, l'activité de première transformation est composée d'un grand nombre d'indépendants, dont les activités de développement sont étroitement liées aux besoins applicatifs de leurs clients, et qui, par ailleurs, capitalisent en interne sur leur savoir faire et collaborent de façon ponctuelle avec des centres de compétence.

La carte page suivante présente la localisation des entités de recherche publique identifiées, ainsi que les différents types de structures à vocation « collaborative » recensées, qu'ils s'agissent des pôles de compétitivité ou bien des instruments du PIA, ainsi que des Instituts Carnot (BRGM, CETIM, CIRIMAT, Energies du futur, I@L, M.I.N.E.S., Onera).

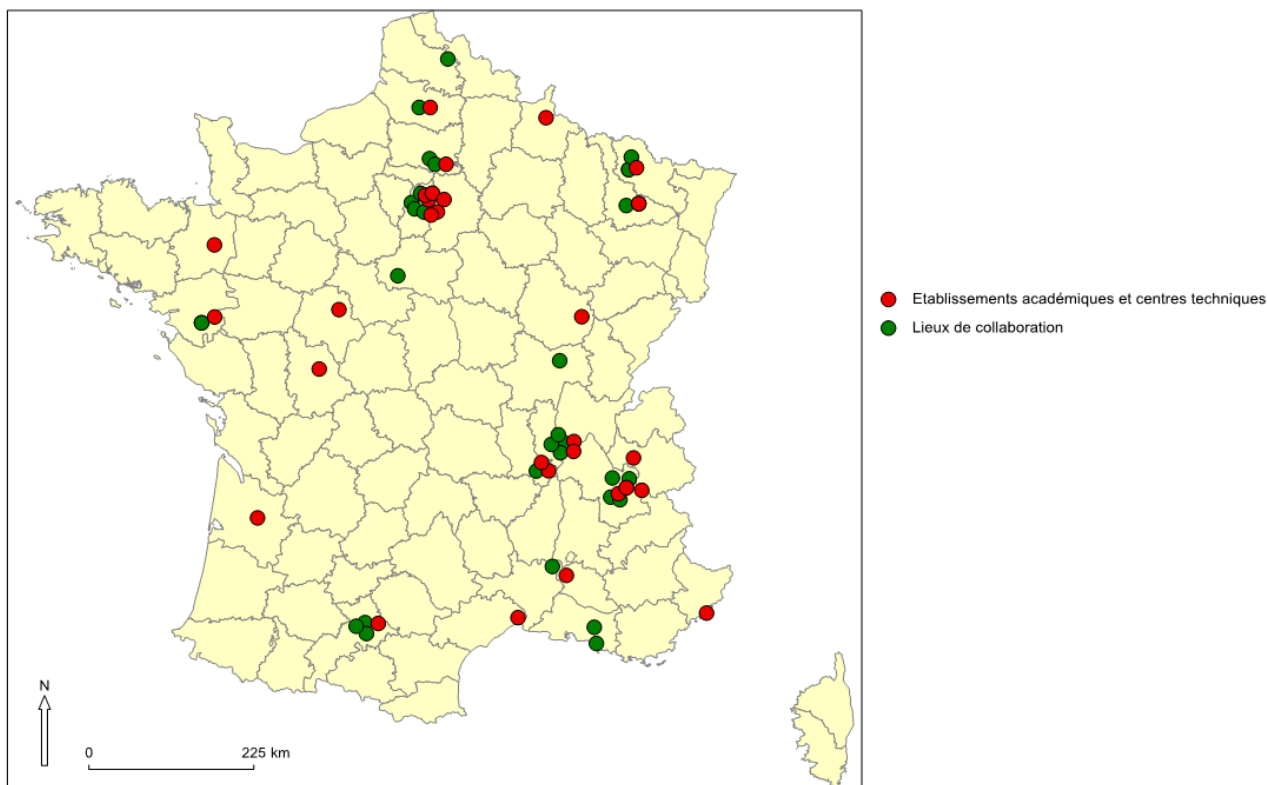
S'agissant des entités de recherche publique identifiées :

- Le milieu académique (établissements d'enseignement supérieur et de recherche) est bien représenté, avec 27 entités de recherche recensées ;
- 5 entités appartiennent à la catégorie organismes / centres techniques ; cela concerne plus spécifiquement 2 organismes de recherche : le CEA et l'ONERA, ainsi que 2 centres

techniques : le CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) et le CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie).

Figure 24 : Localisation des entités de recherche publique et des structures à vocation collaborative

Etablissements académiques, centres techniques et lieux de collaboration



Source : Bilan du recensement des acteurs, annexes 1 et 2

D'un point de vue territorial, trois régions ressortent plus particulièrement : l'Ile-de-France, la Lorraine et la région Rhône-Alpes (à la fois autour de Lyon et Grenoble).

Si l'on croise ces données (localisation des sites industriels et des acteurs de la recherche) avec celles relatives aux informations disponibles relatives aux relations entre acteurs (*cf.* annexe 4), on constate que les profils régionaux sont très disparates. Les régions Nord-Pas-de-Calais et Champagne-Ardenne, par exemple, ont un profil principalement industriel ; en comparaison, l'industrie des métaux non ferreux est moins présente en Lorraine. En revanche, la région Rhône-Alpes présente un profil *a priori* plus équilibré. Partant de ce constat, la question est alors posée de la place accordée à cette industrie dans les politiques régionales.

4.4. Les orientations territoriales

En complément de l'analyse des données disponibles apportant des indications sur le niveau d'activité des différentes catégories d'acteurs, telles que développées dans les paragraphes précédents, il est apparu utile d'apporter un éclairage sur les politiques territoriales élaborées au niveau régional, susceptibles d'avoir un impact sur le secteur de l'industrie des métaux non ferreux (par exemple à travers le fléchage du financement de projets). Ces orientations sont principalement formalisées à travers les schémas régionaux relatifs au développement économique et à l'innovation¹⁷.

L'analyse que l'on peut en faire est essentiellement qualitative, d'autant plus que nombre de ces schémas sont en cours de révision. Cette approche s'est concentrée sur cinq régions revêtant un intérêt particulier s'agissant de l'industrie des métaux non ferreux :

- La région **Nord-Pas-de-Calais** s'est structurée autour des pôles de compétitivité présents sur son territoire (au nombre de 7) et d'un ensemble de 14 pôles régionaux d'excellence économique, maillant le territoire et associés aux principales filières. On note l'existence d'un pôle Mécanique, mais aucun n'est dédié à la métallurgie. La conférence permanente du SRDE a souligné l'importance pour la région de se concentrer autour d'un nombre restreint (six) de domaines d'activités stratégiques (DAS), parmi lesquels figurerait un DAS « Chimie, Matériaux, Recyclage ». Dans cette perspective, les matériaux métalliques ne seraient concernés que par le recyclage ; c'est également le cas dans le cadre de la SRI, à travers le DAS « Traitement des déchets, sédiments, sites et sols pollués ». Ces orientations sont à relier à la présence du pôle de compétitivité TEAM2, dont le recyclage constitue un axe majeur.
- La région **Picardie** souligne l'importance de la filière métallurgie-mécanique sur son territoire. Le SRDE met en exergue les difficultés que rencontre l'industrie régionale ; le souhait de « *ne pas délaisser le savoir-faire qui caractérise l'industrie* » et de mobiliser des « *outils de relance de l'activité sur des secteurs en difficultés* » est mis en avant. Il faut toutefois souligner que les deux pôles de compétitivité présents en Picardie (dédiés respectivement au ferroviaire et aux agro-ressources) n'ont pas de lien direct avec la métallurgie. La SRI comporte un axe « Mécanique, Matériaux, Fibres », dans lequel apparaît explicitement le thème du stockage de l'énergie – de fait, le LabEx STOR-EX est pilotée par l'Université de Picardie Jules Verne.
- A l'instar de ces deux régions, la **Champagne-Ardenne** est marquée par le poids de l'industrie dans l'économie régionale, et notamment de la métallurgie. Cette région avait en particulier identifié l'insuffisance de l'implication de l'industrie régionale du secteur mécanique-métallurgie dans la R&D ; c'est également à ce moment-là qu'émergeait le projet d'un pôle « Matériaux Innovants et Produits Intelligents », basé en Lorraine. Le rapprochement des deux régions a permis la naissance du pôle de compétitivité Materialia ; on peut noter au passage que, s'agissant du secteur des métaux non ferreux, les sites industriels se situent principalement en Champagne-Ardenne, alors que les centres de compétences en métallurgie se situent plutôt en Lorraine. La place accordée à la métallurgie par la région Champagne-Ardenne a abouti en particulier à la mise en place d'actions prioritaires dans le cadre de la SRI : soutien aux projets stratégiques portés par les pôles de compétitivité (dont Materialia), appui aux mutations des

¹⁷ Selon le cas, il s'agira de SRDE (Schéma Régional de Développement Economique), de SRI (Stratégie Régionale d'Innovation), devenue dans le cadre de la programmation 2014-2020 « Stratégie de Spécialisation Intelligente » (S3), de SRESR (Schéma Régional d'Enseignement Supérieur et de Recherche), parfois déclinés sous forme de SRDEI ou de SRESRI, lorsqu'ils intègrent une dimension innovation. Les Programmes Opérationnels FEDER, qui concernent les fonds européens, viennent compléter ces schémas.

secteurs « traditionnels » (ciblant en particulier la forge et la fonderie) et l'amélioration de l'accompagnement du transfert de technologies vers les PME/TPE (principalement avec le pôle Materialia, à travers le Programme Régional d'Innovation en Mécanique et Matériaux).

- Le cas de la région **Rhône-Alpes** est un peu à part : les différents schémas régionaux adoptent en général une approche « transversale », non spécifique à telle ou telle filière. On peut toutefois souligner que parmi les 9 pôles de compétitivité précédemment recensés (cf. §5.3), 5 sont présents en Rhône-Alpes : Tenerrdis, PNB, ViaMéca, Axelera et Trimatec.
- Le SRDE de la région **Midi-Pyrénées** comporte parmi ses objectifs la nécessité de structurer et de renforcer les filières industrielles ; parmi les filières visées en priorité, on note les matériaux, la mécanique et l'aéronautique. Parmi les domaines prioritaires (au nombre de six) retenus dans le cadre de la S3 figure le « couplage matériaux/procédés avancés pour l'aéronautique et diversification », dans le cadre duquel est mentionné le thème des « métaux durs ». Ceci est bien sûr à relier à la présence du pôle Aerospace Valley ; toutefois, il apparaît qu'une seule entreprise entrant dans le périmètre de la présente étude – Aubert & Duval – est adhérente de ce pôle.

Pour clore ce chapitre territorial, on peut souligner que le **Pacte Lorrain**, signé pour la période 2014-2016, comporte un volet dédié à la « Vallée Européenne des Matériaux et de l'Energie ». Plusieurs actions de ce volet concernent spécifiquement le soutien à la R&D, avec en particulier un budget dédié à l'IRT M2P (action 4) et un budget destiné à la création d'une plateforme publique de recherche et de développement industriel dans le domaine de la sidérurgie/métallurgie. Ce projet est en cours de préfiguration ; son programme de recherches n'est pas encore connu, mais pourrait comporter des thèmes tels que les alliages à haute valeur ajoutée ou les poudres pour impression 3D.

4.5. La formation

En France, globalement, la formation en métallurgie est en perte de vitesse. Ce type d'enseignement s'est ainsi marginalisé dans la plupart des écoles d'ingénieur. Actuellement, de tels cursus sont encore dispensés au sein des Ecoles de Mines et des Arts et Métiers, ainsi qu'au sein des Ecoles Centrales, et sont présent dans quelques INP (Instituts Nationaux Polytechniques, de statut universitaire) comme à Nancy¹⁸ ou à Grenoble¹⁹. Toutefois, alors que la métallurgie étaient autrefois considérée comme une discipline majeure, elle est aujourd'hui souvent intégrée au sein d'un ensemble plus large, désigné sous l'appellation de « sciences des matériaux ». Il faut par ailleurs souligner l'existence de compétences notables en chimie et électrochimie (Grenoble, Chimie Paris, etc.), mobilisables pour la mise au point des procédés de production. S'agissant de l'amont minier et plus généralement des géosciences, il subsiste quelques cursus concentrés principalement sur quatre sites : Nancy, Paris, Orléans et Alès.

Du point de vue des besoins de l'industrie, il est à souligner que, d'une part, et de façon générale, les postes requièrent une certaine technicité, accentuée par la place croissante de l'automatisation et de l'informatisation ; mais que d'autre part, ces carrières souffrent d'un déficit d'image, qui peut se traduire par des difficultés à attirer les meilleurs éléments dans les cursus de formation. De plus, le secteur, comme la métallurgie en général, est confronté à un vieillissement de sa pyramide des âges. Il subsiste certes des manques de débouchés pour certains profils : ainsi, actuellement, les diplômés

¹⁸ L'INP est maintenant intégré au sein de l'Université de Lorraine.

¹⁹ INPG, également connu sous le nom de « Phelma ».

se destinant à l'amont minier ne peuvent trouver de postes qu'à l'international ; mais inversement, les tensions sur le recrutement de profils de technicien en production sont fortes, et sont liées, en partie, à un manque d'attractivité – à l'instar de toutes les filières de formation liées aux industries « traditionnelles ». En 2012, dans son rapport sur l'évolution des emplois et des métiers de la métallurgie, l'UIMM insistait sur la nécessité de renforcer l'attractivité de ces carrières industrielles, par des actions menées à la fois au niveau de la branche et au niveau des entreprises elles-mêmes, de façon à inciter les candidats à s'engager dans ce type de carrière et à mieux les accompagner lors de leur intégration.

Dans ce contexte globalement assez peu favorable, on remarque toutefois quelques initiatives, parfois motivées par l'industrie : un exemple en est la chaire de Matériaux du nucléaire créée au sein de l'Ecole des Mines avec le soutien d'AREVA. L'initiative du BRGM, qui a créé en son sein l'Ecole Nationale d'Applications des Géosciences (Enag) pour assurer, en liaison étroite avec les universités et les grandes écoles, des formations initiales et continues, est également à souligner.

5. SYNTHÈSE, CONCLUSIONS

5.1. Une position française en matière de recherche qui tend à s'éroder

S'agissant de la métallurgie en général et de ses applications, la France conserve des compétences académiques de haut niveau dans certains domaines, tels que le stockage électrochimique de l'électricité. Toutefois le rapport conjoint de l'Académie des Sciences et de l'Académie des Technologies dédié à cette discipline souligne la diminution notable du nombre de chercheurs qui lui sont rattachés, couplé à une forte réduction des enseignements en métallurgie dans les cursus de formation. Deux organismes – le CEA et l'ONERA – jouent un rôle moteur essentiel pour les secteurs de l'énergie et de l'aéronautique ; le rapport des deux Académies souligne l'érosion de leurs compétences en métallurgie ; ainsi, le CEA comptait 125 métallurgistes en 1980, contre 60 en 2009, et au sein de l'ONERA, l'effectif serait passé de 45 métallurgistes en 1980 à 30 en 2009, avec une moyenne d'âge de 55 ans.

Du côté de l'industrie, les réorganisations profondes que le secteur a pu connaître ces dernières années ont eu un impact sur les activités de R&D. Ainsi, Tréfinmétaux possédait un centre de recherche à Sérifontaine (une quarantaine de personnes) ; l'entreprise avait été reprise par KME, et le site de Sérifontaine finalement fermé. Inversement, un centre de compétences tel que le LRF demeure pour RTA le centre d'excellence mondial en matière de développement des technologies d'électrolyse pour la production d'aluminium, au bénéfice d'une base industrielle large d'un point de vue géographique (Europe, Afrique, Moyen-Orient).

5.2. Un effet d'entraînement en matière d'innovation inégal selon les secteurs applicatifs, combiné à une faible visibilité dans les spécialisations territoriales

La position française tend donc à s'éroder. Par ailleurs, les données disponibles relatives aux activités de recherche et innovation des acteurs français (brevets, projets collaboratifs, etc.) font apparaître le rôle prédominant joué par deux secteurs : l'énergie (principalement le stockage) et l'aéronautique. Cette tendance n'est bien entendu pas nouvelle, et ne doit pas occulter les activités menées en relation avec d'autres secteurs ; cela signifie néanmoins qu'une grande part des financements publics disponibles est dédiée à ces deux secteurs, qui bénéficient par ailleurs du rôle actif de grands donneurs d'ordre présents sur le territoire national. À côté de ces deux grands secteurs, l'économie circulaire constitue également un moteur majeur en matière de recherche et d'innovation, et est par ailleurs plus propice à l'émergence d'entreprises innovantes – Recupyl et Terra Nova en sont des exemples. Toutefois, il convient de souligner que nombre de projets dans ce domaine, en général focalisés sur les procédés, abordent insuffisamment les enjeux économiques.

Le caractère « transversal » des métaux non ferreux explique qu'ils soient susceptibles d'apparaître parmi les priorités thématiques de nombreuses structures maillant le territoire national. Cela peut prendre par exemple la forme d'une composante « matériaux métalliques » dans les axes stratégiques des pôles à vocation sectorielle (exemple du secteur nucléaire avec PNB, ou du secteur aéronautique avec Aerospace Valley). Parmi les pôles à vocation « transversale », le pôle a priori le plus pertinent serait Materalis, mais la configuration de ce dernier n'est pas tout à fait équilibrée : les compétences académiques se situent principalement en Lorraine, et les sites industriels

(notamment PME) principalement en Champagne-Ardenne, sans que l'on puisse assurer qu'il y ait une réelle implication de ces dernières dans les activités du pôle. Inversement, la région Rhône-Alpes possède une masse critique de compétences académiques et d'acteurs industriels ; néanmoins, la métallurgie n'y apparaît pas clairement comme une priorité régionale, et le thème des matériaux métalliques est dispersé entre plusieurs pôles, sans qu'il y ait de coordination à ce sujet. On peut toutefois noter la complémentarité et les synergies existant entre les pôles Axelera (qui apporte la dimension procédés) et ViamMéca, par exemple sur le thème de la production d'aluminium primaire, et dont la localisation est pertinente dans le cas d'acteurs industriels tels que RTA, Constellium, ou Aubert & Duval.

Il faut par ailleurs rappeler la proximité « naturelle » de la métallurgie avec d'autres industries situées en aval et présentant également un caractère transversal : la fonderie (qui dispose d'un centre technique, le CTIF), la forge et la mécanique. Le pôle Viaméca, par exemple, se positionne sur certains sujets intéressant directement l'industrie des métaux non ferreux ; l'industrie mécanique bénéficie également d'un centre technique dédié – le CETIM, qui dispose de plusieurs implantations –, et d'une coordination nationale entre pôles – MecaFuture, sous la forme d'une charte de coopération signée initialement par les pôles Arve Industries, EMC2, Microtechniques, Materialia et ViaMéca²⁰. Cette dernière a pour vocation de développer les synergies et la coopération entre les pôles « mécaniciens » ; la « formulation et l'élaboration de nouveaux matériaux » (dont les matériaux métalliques), ainsi que les procédés de fabrication, figurent parmi les domaines d'application visés.

5.3. De nouvelles opportunités offertes par les grands programmes nationaux et internationaux...

Ces différents constats incitent à considérer que, en-dehors d'un nombre limité de grands acteurs industriels, l'industrie des métaux non ferreux a dû donner priorité, durant la dernière décennie, à la restructuration de l'outil industriel et sa mise aux normes environnementales, au détriment des projets tournés vers l'innovation. D'où, probablement, une implication insuffisante dans l'élaboration des feuilles de route des instruments structurants mis en place durant cette période, qu'il s'agisse des pôles de compétitivité ou des instruments mis en place dans le cadre du PIA. Il est également frappant qu'il n'existe pas, ni en France ni même au niveau européen, l'équivalent des feuilles de route élaborées par l'industrie nord-américaine pour le cuivre²¹ ou l'aluminium²².

Une nouvelle période s'ouvre, avec la programmation 2014-2020 des fonds européens, la montée en puissance des nouveaux instruments mis en place dans le cadre du PIA (notamment IRT et ITE) et la préparation du PIA2 – lequel couvre une large gamme d'instruments, depuis la recherche fondamentale jusqu'aux démonstrateurs et aux actions au bénéfice des filières. Il serait souhaitable que les acteurs du secteur des métaux non ferreux sollicitent plus activement ces dispositifs et saisissent ces opportunités.

Un point en suspens est celui de la place accordée aux métaux non ferreux au sein des pôles de compétitivité et des instruments qui leur sont adossés (en particulier IRT et ITE). A minima, une coordination entre pôles sur le thème des matériaux métalliques et des procédés de première

²⁰ Le PNB et Elastopole les ont ensuite rejoints.

²¹ *Copper applications technology roadmap*, 2007.

²² *Aluminum industry technology roadmap*, 2003 ; *Canadian aluminium transformation technology roadmap*, 2006.

transformation serait souhaitable, à l'instar de celle qui existe par exemple dans le secteur de l'énergie. C'est déjà en partie le cas au sein de MecaFuture, sans que l'on puisse à ce stade évaluer la place qu'y occupent les métaux non ferreux ; cela pose par ailleurs question du point de vue de la visibilité, MecaFuture étant connoté « mécanique » et non « matériaux ».

5.4. Dans un contexte de relance de la R&D publique...

Du côté de la recherche académique, la prise de conscience des fragilités de la situation actuelle a motivé la mise en place d'un Comité d'Orientation National de la Métallurgie, sous l'égide du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Parmi les premières propositions de ce Comité, on peut noter :

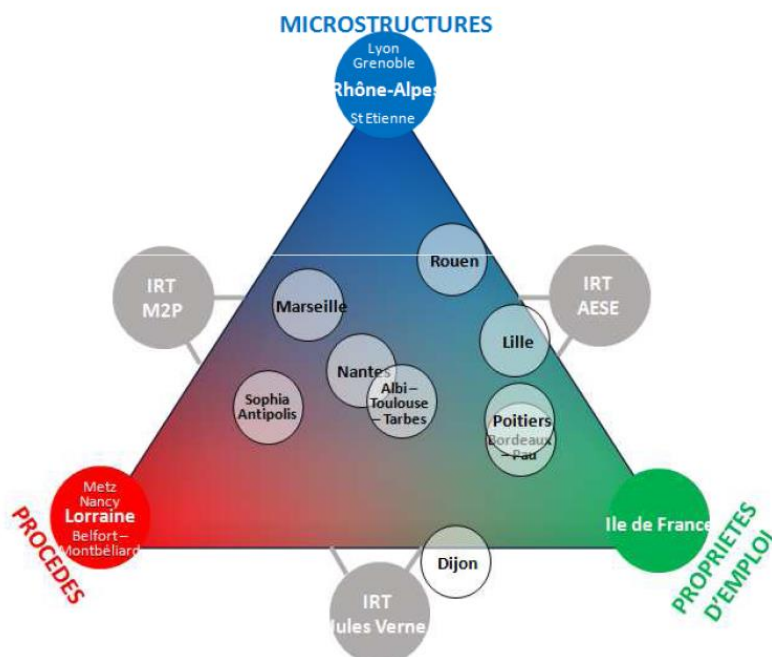
- La création d'un « Réseau National de la Métallurgie », qui s'articulerait autour de trois pôles régionaux représentant une masse critique de compétences, et qui serait connecté à trois IRT (*cf.* schéma page suivante) ;
- Le lancement d'une réflexion sur l'adaptation des formations des techniciens aux nouveaux besoins des entreprises et le développement de la formation par alternance ;
- Des actions permettant d'impliquer les industriels, par exemple à travers la création de chaires d'entreprises et l'implication des industriels dans le pilotage scientifique et opérationnel du Réseau National de Métallurgie ;
- Des actions de promotion de la métallurgie à destination des enseignants et des élèves et étudiants.

D'un point de thématique, six sujets prioritaires ont d'ores et déjà été pressentis :

- Procédés spéciaux pour le recyclage des métaux ;
- Métallurgie fondamentale pour la formulation d'alliages innovants ;
- Métallurgie des procédés de mise en oeuvre ;
- Métallurgie pour l'allègement dans les transports ;
- Métallurgie pour les matériaux en conditions extrêmes (énergie, propulsion, biomédical) ;
- Métallurgie des matériaux fonctionnels (matériaux magnétiques, thermoélectriques, etc.).

Le secteur de l'industrie des métaux non ferreux est potentiellement concerné par chacun de ces sujets : il importe donc que celui-ci s'implique activement dans les réflexions menées au sein du Comité, lequel a indiqué son souhait d'y associer étroitement les industriels. On peut souligner que quatre de ces sujets sont en fait intimement liés : la formulation d'alliages innovants est au coeur des enjeux en matière d'innovation produits pour l'industrie des métaux non ferreux (*cf.* §5.5) et ne peut être déconnectée des procédés permettant leur mise oeuvre, et doit être abordée en relation avec les propriétés d'usage, qu'il s'agisse (de façon non limitative) d'allègement ou d'utilisation en conditions extrêmes.

Figure 25 : Proposition de structuration de la recherche et de la formation en métallurgie sur le territoire français par le Comité National d’Orientation



Enfin, si le maintien de compétences académiques de haut niveau reste un enjeu, on ne peut que souligner la faiblesse du tissu de recherche français du point de vue du développement technologique. Actuellement, seuls trois centres techniques sont *a priori* en position de constituer des appuis pour les acteurs industriels : le CETIM, dont la métallurgie n'est pas la vocation première, le CTIF, avec une forte spécialisation « métier », et le CRITT MDTs, qui développe des compétences en métallurgie des poudres et en impression 3D. Il semble peu réaliste de promouvoir la création d'un centre technique de l'industrie des non ferreux, dont le rôle serait comparable à celui qu'a pu jouer l'IRSID pour la sidérurgie ; il s'agirait plutôt d'utiliser au mieux l'existant : l'IRT M2P en constitue un exemple – à condition toutefois de pouvoir réellement peser sur les choix effectués au sein de cette nouvelle structure, encore en cours de mise en place, ainsi qu'au sein de la future plateforme publique de recherche et de développement industriel dans le domaine de la sidérurgie/métallurgie, à laquelle l'IRT est étroitement associé. D'autres projets en sont encore au stade de l'émergence, notamment sous la forme de plateformes à vocation collaborative dédiées à la fabrication additive ou à l'hydrométallurgie. Enfin, il faut rappeler l'importance du maintien de compétences de haut niveau en matière de procédés de première transformation, qui repose en partie sur le développement des collaborations entre industrie et recherche publique.

5.5. ... Mais qui pourraient se révéler insuffisants pour soutenir les activités de recherche et d'innovation de l'industrie des métaux non ferreux dans son ensemble

A travers les points de vue exprimés par les acteurs industriels interrogés dans le cadre de la présente étude, et au regard des différents aspects analysés, plusieurs tendances émergent.

Tout d'abord, il faut souligner que la majorité des interlocuteurs indique mener des activités en matière de recherche et d'innovation, identifiées en tant que levier susceptible d'être actionné en vue de l'amélioration de la compétitivité.

Dans le détail, les enjeux diffèrent selon que l'on se place du point de vue de l'innovation *produit* ou de l'innovation *procédé*.

L'innovation *produit* peut être abordée de plusieurs façon, en particulier :

- selon une logique d'amélioration continue, en vue de conserver un avantage par rapport à la concurrence : la motivation peut être de rester au même niveau que les concurrents des pays développés, ou bien de maintenir une avance suffisante par rapport à l'offre de produits apparaissant dans des pays tels que la Chine, qui se positionnent dans un premier temps sur des gammes de produits standards ; le cas des superalliages en est l'illustration ;
- selon une logique de montée en gamme, voire en visant « *l'ultraspécialité* » (pour reprendre un terme employé par l'un des interlocuteurs), en réponse à la difficulté de rentabiliser une activité sur des produits de commodité. Pour un produit donné, cela peut s'accompagner d'une diversification du point de vue des applications (exemple : mise au point d'un alliage de plomb spécifiquement destiné aux câbliers).

Dans tous les cas, la relation avec les clients joue souvent un rôle-clé en matière d'innovation. Cette relation ne se résume pas à une relation client/fournisseur, et intègre une dimension de codéveloppement. Il y a en effet une forte interdépendance entre l'industrie des métaux non ferreux et un grand nombre de secteurs d'activité, résultat de la multiplicité des applications concernées par ces métaux et de la difficulté, dans de nombreux cas, à recourir à des solutions de substitution. Une des conséquences de cette situation est que cette industrie travaille souvent en collaboration étroite avec ses clients lors de la mise au point de nouveaux produits.

Le tableau présenté page suivante présente, par grand secteur d'activité, les principaux axes d'innovation en matière de métaux non ferreux, en relation avec les applications concernées.

Comme le montre ce tableau (non exhaustif), la très grande majorité des produits de l'industrie des métaux non ferreux sont en fait des alliages : dans la plupart des cas, c'est la combinaison de plusieurs métaux qui permet d'obtenir les performances recherchées. De plus, la mise au point d'un alliage est aussi conditionnée par les étapes de transformation permettant d'aboutir au produit final : selon le cas, l'alliage devra être apte à la fonderie, à la soudure, au formage, etc.

Secteur	Applications	Axes d'innovation
<i>Transports</i>	Groupe motopropulseur, pièces de liaison pour l'automobile	Amélioration des alliages d'aluminium pour pièces de fonderie, développement des alliages de magnésium
	Carrosserie et pièces de structure	Amélioration de l'aptitude au formage des tôles en alliage d'aluminium
	Echangeurs thermiques	Laminés minces en alliages d'aluminium (réduction des épaisseurs, amélioration des performances de l'échangeur)
	Pièces de structure pour l'aéronautique	Allègement des structures et amélioration de la durabilité (tenue mécanique, tenue à la corrosion) : amélioration des alliages d'aluminium à hautes propriétés (composition et procédés d'élaboration et de mise en forme, usinabilité), nouveaux alliages de titane
	Pièces de moteur pour l'aéronautique	Alliages de titane pour pièces à températures intermédiaires, alliages de nickel ou de cobalt pour pièces à températures élevées
	Réseaux embarqués	Alliages de cuivre pour conducteurs à section réduite ; alliages pour connecteurs (fonderie de précision d'alliages de zinc ou d'aluminium)
<i>Energie</i>	Gaines de combustible nucléaire	Amélioration des alliages de zirconium
	Plaques bipolaires métalliques pour piles à combustible	Alliages de nickel pour piles à haute température (SOFC : Solid Oxide Fuel Cells)
	Energies marines, éolien offshore	Alliages pour usage en milieu marin (ex : cuivre-nickel) ; blindages en plomb pour câbles sous-marins
<i>Santé</i>	Prothèses et implants	Amélioration de la biocompatibilité, de la tenue mécanique et de la résistance à la corrosion et à l'usure : alliages à teneur en nickel réduite, nouveaux alliages cobalt-chrome-molybdène ou alliages de titane
	Surfaces anti-bactériennes	Alliages de cuivre pour usage en milieu médical
<i>Emballage</i>	Emballages rigides	Diminution des épaisseurs des feuilles d'aluminium (laminage) et aptitude au formage (emboutissage, etc.)
<i>Défense</i>	Blindages « légers »	Amélioration des alliages d'aluminium (notamment aluminium-lithium)
	Munitions	Alliages de tungstène (amélioration de la microstructure)

Comme on l'a souligné, la proximité avec le client joue un rôle-clé, et les besoins sont multiples. De nouvelles opportunités apparaissent, liées à des applications émergentes, comme dans le cas des piles à combustible. Il faut toutefois souligner que pour certaines applications, l'offre française actuelle en alliages est limitée ou inexistante, comme dans le cas des alliages à base de zinc ou de magnésium.

Concernant l'innovation *procédés*, il faut d'abord souligner que la frontière est souvent ténue entre ce qui relève de l'innovation et ce qui relève de la modernisation (par exemple, l'automatisation et la robotisation). Dans la pratique, cette distinction est un peu théorique : ainsi, même si une innovation en matière de procédés provient de pays leaders tels que l'Allemagne ou le Japon, son intégration par les entreprises peut impliquer des développements spécifiques avant d'être pleinement opérationnelle au sein de l'outil de production. Dans le cas présent, y compris pour les PME, l'innovation en matière de procédés s'appuie avant tout sur le savoir-faire interne, ce qui implique la présence de personnel qualifié et la possibilité de mobiliser des ressources financières internes pour ce faire. Le fait de prendre en charge ce type de projet en interne est principalement motivé par deux raisons : d'une part, le fait que le savoir-faire lié aux procédés est critique pour l'entreprise et doit être suffisamment maîtrisé en interne ; d'autre part, en raison de la faiblesse de l'appui technologique disponible en France. Néanmoins, à mesure que les procédés atteignent leur niveau de maturité, les défis pour progresser mettent davantage en jeu une revisite des notions et sciences fondamentales : à ce stade, les savoir-faire internes ne sont plus suffisants pour créer les ruptures qui seraient de nature à repositionner l'industrie - et les acteurs français en particulier. Autrement dit, le niveau de rupture attendu n'est plus totalement compatible avec une base de compétences uniquement interne.

Au niveau des moyens disponibles pour mener à bien des projets innovants, la situation est bien entendu très contrastée entre :

- d'une part, les grands groupes possédant leurs propres moyens internes dédiés à la R&D, et en capacité de gérer les relations (souvent complexes) avec les acteurs académiques ; on observe différents cas de figure et problématiques différentes : groupes avec des moyens R&D en propre, basés en France, en capacité de s'impliquer dans les grands projets collaboratifs (type ANR et FUI) et d'établir des collaborations étroites avec les grands donneurs d'ordres ; groupes au sein desquels la R&D est localisée hors de France, ce qui n'est incompatible avec le fait de mener des projets innovants : il s'agira alors plutôt d'innovations orientées vers l'applicatif, en relation avec les clients locaux.
- et d'autre part, les PME indépendantes s'appuyant principalement sur leurs ressources internes et ponctuellement sur des ressources externes.

Pour ces dernières, le CIR (Crédit d'Impôt Recherche) est souvent la principale aide au financement. Deux points clés sont toutefois à souligner :

- l'innovation est un levier pour améliorer la rentabilité de l'entreprise (*via* la montée en gamme ou bien l'amélioration de la performance des procédés), mais la faible rentabilité actuelle de nombreuses entreprises peut les empêcher de dégager des ressources suffisantes pour mener à bien des projets innovants.
- il est frappant de constater que des sources habituelles de financement des projets de PME (BPIFrance, financements régionaux) sont rarement cités, et que sauf exception, aucun des

industriels interrogés ne mentionne spontanément de pôle de compétitivité parmi les dispositifs d'accompagnement. Ceci corrobore le constat fait sur la quasi-absence de la métallurgie dans les priorités thématiques affichées au niveau des régions. Selon un des industriels interrogés, la métallurgie reste mal perçue en tant que telle par les financeurs.

Rappelons par ailleurs qu'un des freins à l'innovation fréquemment cités est la complexité des systèmes d'aide à l'innovation, de la gestion des relations avec les partenaires académiques, etc., qui sont autant de freins à la mise en place d'actions volontaristes d'innovation « aidée ». C'est encore plus vrai pour les PME que pour les grands groupes, qui peuvent disposer en interne de structures spécialisées de gestion de cette problématique.

Au regard des principaux points faibles ainsi identifiés, trois pistes prioritaires d'action émergent :

- la sensibilisation des financeurs et des structures d'accompagnement sur l'importance de l'innovation dans le secteur de l'industrie des métaux non ferreux et des enjeux économiques associés ;
- la création de conditions favorables permettant d'enclencher un cercle vertueux : amélioration de la rentabilité, permettant de dégager des ressources pour les projets innovants, contribuant à leur tour à la rentabilité ; cette piste est donc indissociable des leviers identifiés dans le cadre du volet 1 ;
- le renforcement du maillon faible du développement technologique, en termes d'appuis techniques au service des entreprises (sous forme de plateformes technologiques, par exemple).

6. ANNEXE 1 : LISTE DES ACTEURS ACADÉMIQUES

Laboratoire	Etablissement de rattachement ou tutelle	Type	Département
LCME (Laboratoire de Chimie Moléculaire et Environnement)	Université de Savoie	Académique	73
CEM (Chimie et électrochimie de Matériaux)	Institut Jean Lamour	Académique	54
SI2M (Science et ingénierie des matériaux - Métallurgie)	Institut Jean Lamour	Académique	54
MSSMat (Mécanique des Sols, Structures et Matériaux)	Ecole Centrale Paris	Académique	92
MATEIS (Matériaux : Ingénierie et Science)	INSA Lyon	Académique	69
ICB (Laboratoire Interdisciplinaire Carnot Bourgogne)	Université de Bourgogne	Académique	21
Centre des Matériaux	Mines ParisTech	Académique	91
CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie)	CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie)	Centre technique ou organisme	92
IJLRA (Institut Jean Le Rond d'Alembert)	UPMC	Académique	75
INSP (Institut des Nanosciences de Paris)	UPMC	Académique	75
CRETA (Consortium de Recherche pour l'Emergence de Technologies Avancées)	Université Joseph Fourier	Académique	38
LMI (Laboratoire des Multi-matériaux et Interfaces)	Université Claude Bernard Lyon 1	Académique	69
CEMEF (Centre de Mise en Forme de Matériaux)	Mines ParisTech	Académique	6
iCMCB (Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux)	Université de Bordeaux	Académique	33
Institut Pprime (recherche et ingénierie en matériaux, mécanique, énergétique pour les transports, l'énergie et l'environnement)	ENSMA (Ecole Nationale Supérieure de mécanique et d'aéronautique)	Académique	86
Département Matériaux et structures métalliques	ONERA	Centre technique ou organisme	
LEM3 (Laboratoire d'étude des microstructures et de mécanique des matériaux)	Université de Lorraine	Académique	57
LSG2M (Laboratoire de Science et Génie des Matériaux et de Métallurgie)	Ecole des Mines de Nancy	Académique	54
ISCR/CM (Institut des Sciences Chimiques de Rennes, équipe Chimie - Métallurgie)	INSA de Rennes	Académique	35
CETIM (Centre technique des industries mécaniques) - Senlis	CETIM	Centre technique ou organisme	
DIPI (Laboratoire Diagnostic et Imagerie des procédés industriels)	ENISE (Ecole nationale d'ingénieur de Saint-Etienne)	Académique	42
Laboratoire George Friedel (matériaux, mécanique, procédés)	Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne	Académique	42

SIMaP (Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés)	INP Grenoble	Académique	38
Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles)	CEA	Centre technique ou organisme	38
LRCS (Laboratoire de réactivité et chimie du solide)	Université Jules Verne	Académique	80
Cirimat	Université Toulouse III	Académique	
Laboratoire de Génie Chimique	Université Toulouse III	Académique	31
Institut des matériaux Jean Rouxel	Université de Nantes	Académique	44
PCM2E (Physicochimie des Matériaux et Electrolytes pour l'énergie)	Université François-Rabelais	Académique	37
ICMPE (Institut de chimie et des matériaux Paris-Est)	Université Paris-Est	Académique	94
ICGM (Institut Charles Gerhardt MONTPELLIER)	Université de Montpellier 2	Académique	34
ICSM (Institut de Chimie Séparative de Marcoule)	CEA	Centre technique ou organisme	30
CRITT MTDS (Matériaux, dépôts et traitement de surface)	CRITT MDTs	Centre technique ou organisme	8
LEPMI (Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie des Matériaux et des Interfaces)	Université de Grenoble	Académique	38
CEMHTI (Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation)	CNRS	Académique	45

Remarque : le CIRIMAT, l'ONERA et le CETIM sont mentionnés ici à titre indicatif ; ils sont comptabilisés parmi les lieux de collaboration du fait de leur statut d'Instituts Carnot.

7. ANNEXE 2 : LISTE DES LIEUX DE COLLABORATION

Laboratoire	Type	Département
M2P (Matériaux, Métallurgie, Procédés)	IRT	57
Saint-Exupéry	IRT	31
Jules Verne	IRT	44
IPVF (Institut Photovoltaïque d'Île-de-France)	ITE	91
Supergrid	ITE	69
Axel'One	PFI	69
Steeve	PFI	60
Inovsys	PFMI	13
EMC2	Pôle de compétitivité	44
Materialia	Pôle de compétitivité	57
Team2	Pôle de compétitivité	62
Viaméca	Pôle de compétitivité	63
Aerospace valley	Pôle de compétitivité	31
Tenerrdis	Pôle de compétitivité	38
Trimatec	Pôle de compétitivité	30
Pôle Nucléaire Bourgogne	Pôle de compétitivité	71
Axelera	Pôle de compétitivité	69
MatMéca	Equipex	91
EcoX	Equipex	38
Ressources21	Labex	54
Storex	Labex	80
DAMAS	Labex	54
ICOME2	Labex	13
CEMAM	Labex	38
BRGM	Institut Carnot	45
CETIM	Institut Carnot	60
CIRIMAT	Institut Carnot	31
Energies du futur	Institut Carnot	38
I@L	Institut Carnot	69
M.I.N.E.S.	Institut Carnot	75
ONERA	Institut Carnot	91

8. ANNEXE 3 : LISTE DES PROJETS RECENSÉS

De manière générale, l'identification des projets s'est appuyée sur quatre types de projets financés afin de recenser les projets ayant un lien fort avec la thématique des métaux non ferreux : ANR, FUI, PIA, PCRD.

Les projets ANR pris en compte sont issus des appels à projet suivants :

- Matériaux et procédés pour des produits performants (période 2011-2013)
- Matériaux fonctionnels et procédés innovants (période 2008-2010)
- Chimie durable, industrie et innovation (période 2010-2013)
- Chimie et procédés pour le développement durable (période 2008-2009)
- Production renouvelable et gestion de l'électricité (période 2011-2013)
- Stockage innovant de l'énergie (période 2008-2010)
- Systèmes énergétiques efficaces et décarbonnés (période 2011-2013)
- Habitat intelligent et solaire photovoltaïque (période 2008-2010)

Les projets FUI ont été recensés via le site internet des pôles de compétitivité. Sur ce site figurent deux bases de données : « projets en cours » et « projets en fin de conventionnement ». Ces bases de données regroupent une sélection de projets financés par le FUI. Par conséquent, la liste des projets FUI ne sera pas exhaustive.

Dans ces deux bases, les projets FUI ont été recensés via les domaines d'application suivants :

- Matériaux
- Aéronautique / Espace
- Énergies renouvelables
- Microtechnique / Mécanique
- Recyclage

Certains projets FUI ont également pu être recensés via le site internet des pôles de compétitivité.

Les projets PCRD ont été identifiés via la plateforme Cordis. A chaque fois, le critère d'une date de démarrage du projet postérieure au 01/01/2008 a été sélectionné. Les recherches ont été effectuées à partir de mots-clés figurant dans le titre du projet.

Nom	Intitulé long	Type de financement	Année du début du projet
DUSTI* ²³	Durabilité des structures aéronautiques en alliage de titane	ANR	2013 ²⁴
FICHTRE*	Films chauffant transparents imprimables à base de nanofils métalliques pour le dégivrage/désembuage	ANR	2013
MIMINELA*	Mécanismes interfaciaux et matériaux d'anodes inertes pour l'électrolyse de l'aluminium	ANR	2013
EcoMetals*	Procédés bio-hydrométallurgiques innovants et éco-efficaces pour la récupération des métaux stratégiques et rares : ressources primaires et secondaires	ANR	2013
SILEXE	Liquides ioniques pour le recyclage de métaux stratégiques par procédé d'extraction/électrodéposition	ANR	2011
COCASCOPE	Modélisation du comportement de câbles supraconducteurs à différentes échelles pour l'optimisation de leurs performances électriques	ANR	2013
INDIANA	Influence des défauts de fonderie dans l'endommagement par fatigue thermomécanique oligocyclique des alliages d'aluminium obtenus par un procédé à modèle perdu	ANR	2013
TESAMI	Titane et ses alliages en milieu irradiés	ANR	2013
TITUS	Critères d'optimisation des alliages de titane pour améliorer leur usinabilité	ANR	2013
COCOTRANS	Couches conductrices d'argent pour vitrages à isolation thermiques et électrodes d'OLED	ANR	2012
MAFHENIX	Matériaux fonctionnels de type Heusler Ni-Mn-X	ANR	2012
NANOTICAL	Nanocomposites préparés par broyage et frittage réactifs, renforcés par du TiC et à matrice aluminium	ANR	2011
FLUOTI	Fluotournage du titane TA6V à froid	ANR	2011
COMETTI	Comportement mécanique et tribologique des composites à matrice titane	ANR	2010
SPLIT	Sputtering appliqué aux accumulateurs au lithium	ANR	2010

²³ Lorsque le nom du projet est suivi du signe *, cela signifie que les données disponibles concernant ce projet étaient incomplètes, notamment, les liens entre acteurs n'ont pas pu être utilisés.

²⁴ Lorsque la date des projets figure en rouge, cela signifie que la date de début du projet n'était pas disponible. Dans ce cas là, l'année de l'appel à projets a été mentionnée à la place.

IRIS*	Innovative manufacturing route for intermetallic alloys by spark plasma net shaping	ANR	2009
MODELIA*	Modélisation électrochimique du comportement des phases intermétalliques dans les alliages d'aluminium : approche multi-échelle de matériaux polyphasés	ANR	2009
OPERAS*	Optimisation des procédés d'élaboration par refusion (Arc-Slag)	ANR	2009
TIBBiA*	Titane Beta Biocompatible adaptatif	ANR	2009
FAMQμS	Fabrication of Amorphous Metal Objectifs of μSize	ANR	2012
ALIBABA	Analyse et Modélisation Multi-Échelles des Phénomènes de dégradation des Batteries Li-Ion	ANR	2012
VISION	Etude Fine des Mécanismes de Vieillessement des Batteries Li-ION associées aux Energies Renouvelables	ANR	2011
LiO2	Development of a rechargeable lithium-air battery with very high energy density	ANR	2010
HT-LION	Accumulateur Li-ion fonctionnant à haute température	ANR	2009
ALISé	MAtériaux NMC riches en Li et Mn pour batteries Li-ion de forte énergie associées aux énergies renouvelables	ANR	2012
ULTRACIS_M	Vers l'industrialisation des cellules ultraminces à base de CIGSes	ANR	2013
AZTEQUE	Accumulateur Zinc-Air pour transport électrique	ANR	2012
MALHYCE	Nouvelle famille d'Alliages HYdrurables s'affranchissant de la disponibilité des matériaux CritiquEs	ANR	2011
SoliBat	Batteries "tout solide" développées par Frittage Flash	ANR	2011
NovACEZ	Nouveaux Absorbours chalcochénures à base de Cuivre, Étain et Zinc pour le photovoltaïque en couches minces	ANR	2011
AmiCIS	Adaptation du contact arrière de molybdène et des interfaces pour les photopiles à base de jonctions CIS/couches tampon alternatives	ANR	2008
ANZAS*	Accumulateurs nickel zinc pour applications stationnaires	ANR	2008
SUPECCO	Electrodes pour Supercondensateurs à base d'Oxydes de Cobalt	ANR	2008
Falafel	Fabrication additive par procédés laser et faisceau d'électrons	FUI	2010
GPP Multimat	Grand projet poudres multi-matériaux	FUI	2007
Ofélia	Optimisation d'une filière éco-efficente	FUI	2011

	"Aluminium-Lithium" pour l'aéronautique		
Voltarec	Recyclage de panneaux PV	FUI	2010
PROCYon ²	Développement des procédés de fabrication et de recyclage de nouveaux composants pour systèmes batterie Li-ion	FUI	2011
Ycare	Procédés de recyclabilité par voie chimique et non-thermique des batteries au plomb	FUI	2010
TREZ	Industrialisation d'un procédé de recyclage de déchets zincifères	AMI Ademe	2011
EXOMET	Physical processing of molten light alloys under the influence of external fields	PCRD	2012
SuPLight	Sustainable and efficient production of light weight solutions	PCRD	2010
ECEFA	Eco-efficient aluminium for aircraft	PCRD	2011
AFSIAL	Advanced fuselage and wing structure based on innovative Al-Li alloys	PCRD	2012
EFEVE	Development of a new high performance material associated to a new technological energetic, flexible, economical, versatile and ecological process to make super strong and light weight components	PCRD	2012
ULTRAWIRE	Ultraconductive copper-carbon nanotube wire	PCRD	2013
HI-POYENTIAL	Higly Innovative Isothermal Forging of Gamma TiAl Alloy for LPT blades	PCRD	2011
AIMERE	Aircraft Metal Recycling	PCRD	2012
POLYZION	Fast rechargeable zinc-polymer battery based on ionic liquids	PCRD	2009
SCINTILLA	Scintillation Detectors And New Technologies For Nuclear Security	PCRD	2011
AMAZE	Additive Manufacturing Aiming Towards Zero Waste & Efficient Production of High-Tech Metal Products	PCRD	2013

9. ANNEXE 4 : CARTOGRAPHIE DES ACTEURS ET DE LEURS INTERACTIONS

Concernant les relations entre catégories d'acteurs, les liens suivants ont été recensés sur la base des informations disponibles :

- Liens entre entreprises et laboratoires, à travers la participation conjointe aux projets collaboratifs ;
- Liens entre entreprises ou laboratoires et « lieux de collaborations » ; ce lien est à considérer au sens de « est membre ou adhérent », restreint dans le cas présent à quatre types de structures : pôles de compétitivité, IRT, ITE et PFI.

Les deux cartes suivantes présentent tout d'abord la répartition entre catégories d'acteurs suivant les régions, puis l'ensemble des liens identifiés, à la fois inter-régionaux et intra-régionaux.

Figure 26 : Cartographie des 3 principales catégories d'acteurs : entreprises, laboratoires et lieux de collaboration

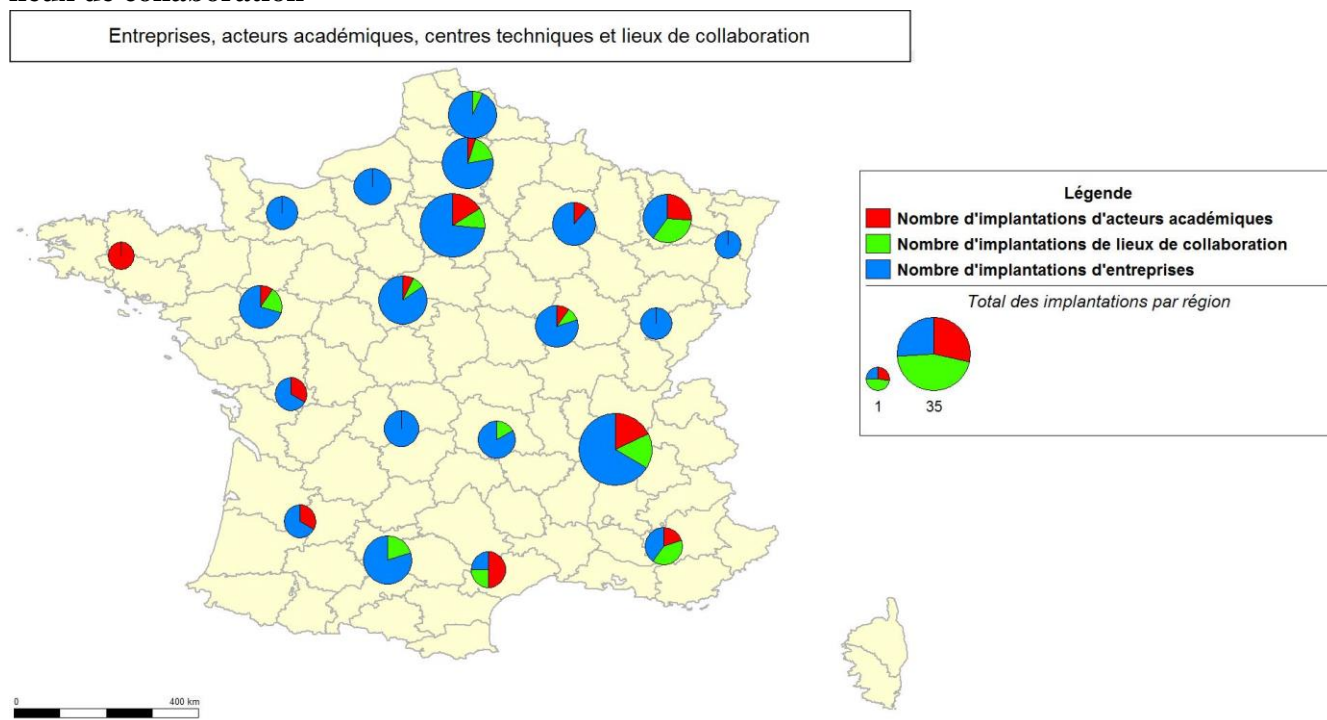
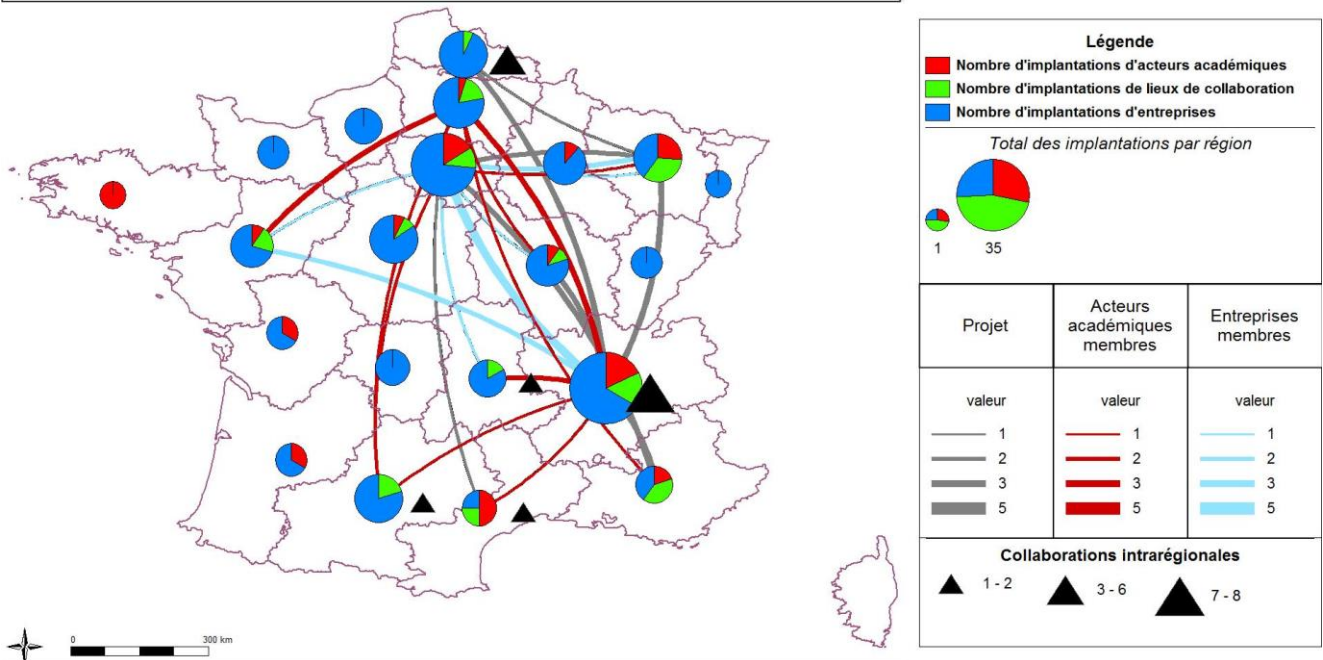


Figure 27 : Cartographie des liens entre catégories d'acteurs

Liens entre entreprises, acteurs académiques, centres techniques et lieux de collaboration



10. INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Exemple de feuille de route technologique de l'industrie du cuivre	17
Figure 2 : Schéma représentant les étapes successives de l'extraction du zinc par hydrométallurgie	21
Figure 3 : Composition minérale de deux roches contenant du nickel	22
Figure 4 : Schéma descriptif des mécanismes de biolixiviation	27
Figure 5 : Liste (non exhaustive) des installations de biolixiviation en tas dans le monde.	28
Figure 6 : Liste (non exhaustive) des installations de biolixiviation dynamique dans le monde.....	29
Figure 7 : Procédés conventionnels de métallurgie des poudres	30
Figure 8 : Feedstock avec poudre métallique (gauche) et compoundeur* pour feedstock (droite) ...	31
Figure 9 : Nature des gains obtenus grâce à un procédé de métallurgie des poudres	33
Figure 10 : Gisements de métaux disponibles à partir de certaines sources de déchets.....	40
Figure 11 : Schéma simplifié de la structure d'un supercondensateur	45
Figure 12 : Illustration d'une batterie (mode charge)	46
Figure 13 : Schéma illustratif des différentes couches composant une batterie Lithium-Air	48
Figure 14 : Accumulateurs et batteries, parts de marché et principales caractéristiques	49
Figure 15 : Coûts des différentes batteries à destination des véhicules électriques (en US\$/kWh)...	50
Figure 16 : Classement du top 7 des fabricants de batteries Lithium-ion en 2008	53
Figure 17 : Coupe du moteur Pratt & Whitney PW4000	56
Figure 18 : Composition moyenne des superalliages aéronautiques.....	56
Figure 19 : Photographie d'un câble montrant les différentes couches qui le constituent.....	61

Figure 20 : Estimation des ventes de Nexans sur le marché des câbles sous-marins haute tension ..	63
Figure 21 : Cycle de recyclage des câbles par l'entreprise Recycâbles	64
Figure 22 : Répartition des implantations des entreprises, par département (sièges – en bleu – et établissements)	71
Figure 23 : Répartition des effectifs par entreprise (sièges uniquement).....	72
Figure 24 : Localisation des entités de recherche publique et des structures à vocation collaborative	74
Figure 25 : Proposition de structuration de la recherche et de la formation en métallurgie sur le territoire français par le Comité National d'Orientation	82
Figure 26 : Cartographie des 3 principales catégories d'acteurs : entreprises, laboratoires et lieux de collaboration	94
Figure 27 : Cartographie des liens entre catégories d'acteurs.....	95

11. INDEX DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Production mondiale et part de l'hydrométallurgie dans la production de différents métaux non ferreux (alumine, cuivre, nickel, zinc).....	24
Graphique 2 : Production mondiale et part de l'hydrométallurgie dans la production de différents métaux non ferreux (argent, cobalt, lithium, magnésium, molybdène)	24
Graphique 3 : Matériaux utilisés pour l'impression 3D (chiffres donnés en % de volume de production), prévisions 2025.....	34
Graphique 4 : Recyclage de 4 métaux non ferreux (aluminium, cuivre, plomb, zinc) – quantités en jeu et taux d'utilisation en France	39
Graphique 5 : Publications de demandes de brevet européens relatifs aux métaux non ferreux	67
Graphique 6 : Publications par nationalité des déposants	68
Graphique 7 : Publications de demandes de brevet européens relatifs à la première transformation des métaux.....	69

12. BIBLIOGRAPHIE

La métallurgie, science et ingénierie ; Académie des Sciences / Académie des Technologies, éditions EDP, 2011

Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société ; P. Bihouix, B. de Guillebon, éditions EDP, 2010

R&D industrielle en métallurgie ; B. Dubost, F. Mudry et A. Grellier, Techniques de l'Ingénieur, 2011

Situation de la sidérurgie et de la métallurgie françaises et européennes dans la crise économique et financière et sur les conditions de leur sauvegarde et de leur développement – rapport à l'Assemblée Nationale ; 2013

Strategic implementation plan for the European Innovation Partnership on raw materials ; 2013

Critical Raw Materials Substitution Profiles ; CRM InnoNet, 2013

European Technology Platform for Advanced Engineering Materials and Technologies – Strategic Research Agenda, 2012

European Technology Platform on Sustainable Mineral Resources - Strategic Research and Innovation Agenda, 2013

Metallurgy Europe – A Renaissance Programme for 2012-2022 ; European Science Foundation, 2012

Aluminum Industry Roadmap ; Aluminum Association, 2003

Canadian aluminium transformation technology roadmap, Réseau Trans-Al, 2006

Copper Applications Technology Roadmap ; International Copper Association, 2012

Etude du potentiel de recyclage de certains métaux rares ; ADEME, 2010

PIM medical applications ; International Journal of Powder Metallurgy, vol. 48, 2012

MIM : A Manufacturing Process for Precision Engineering Components ; European Powder Metallurgy Association, 2013

Powder Metallurgy Industry Roadmap ; Metal Powder Industries Federation, 2012

Advanced Gas Turbine Materials and Coatings ; GE Energy, 2004

Materials for Gas Turbines – An Overview, Advances in Gas Turbine Technology ; N.R. Muktinutalapati, InTech Open, 2011

A short history of hydrometallurgy ; F. Habashi, Hydrometallurgy, vol. 79, 2005

Hydrometallurgical recovery of valuable metals from secondary raw materials ; S. Virolainen, Lappeenranta University of Technology, 2013

Les systèmes de stockage d'énergie – Feuille de route stratégique ; ADEME, 2011

Etat de l'art des technologies de désulfatation des accumulateurs au plomb ; ADEME, 2011

13. LISTE DES PERSONNES CONSULTÉES

Les questions relatives à la recherche et à l'innovation ont été abordées dans le cadre des entretiens réalisés en phase 1 de la présente étude. Pour mémoire, les entreprises interrogées ont été les suivantes : AFICA, Aluminium France Extrusion, Aubert & Duval, Befesa Valera, DCX Chrome, ERAMET Nickel, Eurotungstène, Gindre, Griset, KME France, Koniambo Nickel, Le Bronze Industriel, Métal Blanc, Métaux Blancs Ouvrés, M-Lego/Poudmet, Praxair, Recytech, Rio Tinto Alcan, SAPA, STCM et Umicore.

De façon complémentaire, les personnes suivantes ont été interrogées à propos des six études de cas retenues :

Entreprise / organisme	Contact	Fonction
<i>Hydrométallurgie</i>		
CEA	Frédéric Goettman	Resp. projet IEH
ERAMET	Vincent Trelut	VP stratégie et business development
<i>Métallurgie des poudres</i>		
Cookson CLAL	Bruno Costet	Directeur du développement Europe
European Powder Metallurgy Association	Olivier Coube	Directeur technique
<i>Recyclage</i>		
BRGM	Patrick d'Hughes	Directeur du département déchets et matières premières
ERAMET	Emeric Burin des Roziers	Ex-directeur recyclage de la division Manganèse
<i>Stockage électrochimique de l'énergie</i>		
Enersys	Philippe Lemaire	Resp. laboratoire de chimie
<i>Alliages hautes performances</i>		
Aubert & Duval	Hubert Schaff	Directeur partenariat et innovation
<i>Conducteurs pour les câbles électriques</i>		
Nexans	Francis Debladis	Resp. centre de recherche métallurgie
<i>Transversal</i>		
IRT M2P	Christophe Millière	Directeur

Les rapports Pipame déjà parus

- Diffusion des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) dans le bâtiment, juin 2009
- Étude de la chaîne de valeur dans l'industrie aéronautique, septembre 2009
- La logistique en France : indicateurs territoriaux, septembre 2009
- Logistique mutualisée : la filière « fruits et légumes » du marché d'intérêt national de Rungis, octobre 2009
- Logistique et distribution urbaine, novembre 2009
- Logistique : compétences à développer dans les relations « donneur d'ordre – prestataire », novembre 2009
- L'impact des technologies de l'information sur la logistique, novembre 2009
- Dimension économique et industrielle des cartes à puces, novembre 2009
- Le commerce du futur, novembre 2009
- Mutations économiques pour les industries de la santé, novembre 2009
- Réflexions prospectives autour des biomarqueurs, décembre 2009
- Mutations économiques dans le domaine de la chimie, février 2010
- Mutations économiques dans le domaine de la chimie – volet compétences, février 2010
- Mutations économiques dans le domaine automobile, avril 2010
- Maintenance et réparation aéronautiques : base de connaissances et évolution, juin 2010
- Pratiques de logistique collaborative : quelles opportunités pour les PME/ETI ?, février 2011
- Dispositifs médicaux : diagnostic et potentialités de développement de la filière française dans la concurrence internationale, juin 2011
- Étude prospective des bassins automobiles : Haute-Normandie, Lorraine et Franche-Comté, novembre 2011
- M-tourisme, décembre 2011
- Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020, février 2012
- La gestion des actifs immatériels dans les industries culturelles et créatives, mars 2012
- Le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France, avril 2012
- Enjeux et perspectives des industries agroalimentaires face à la volatilité du prix des matières premières, octobre 2012
- Potentiel et perspectives de développement des plates-formes d'échanges interentreprises, janvier 2013
- Étude sur la location de biens et services innovants : nouvelles offres, nouveaux opérateurs, nouveaux modèles économiques ?, janvier 2013
- Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobiles et aéronautiques, mars 2013
- Chaînes logistiques multimodales dans l'économie verte, mars 2013
- Évolutions technologiques, mutations des services postaux et développement de services du futur, juillet 2013
- Imagerie médicale du futur, octobre 2013
- Relocalisations d'activités industrielles en France, décembre 2013
- Benchmark européen sur les plateformes chimiques, quels sont les leviers pour améliorer la compétitivité des plateformes françaises ?, septembre 2014
- Les innovations technologiques, leviers de réduction du gaspillage dans le secteur agroalimentaire : enjeux pour les consommateurs et pour les entreprises, novembre 2014

Crédits photographiques

Couverture (horizontalement de gauche à droite) : ©Rio Tinto 2010 ; D.R ; © Antonin Borgeaud/Interlinks Image/Eramet ; ©Rio Tinto 2010 ; © winterling – Thinkstosk ; © Joël Damase/Eramet.

Le secteur des métaux non ferreux est un fournisseur incontournable d'autres secteurs industriels majeurs, tels que l'automobile, l'aéronautique, l'espace, le bâtiment ou encore la défense. Par les innovations technologiques qu'il porte, il met également à disposition de ces secteurs des solutions innovantes et constitue ainsi un maillon essentiel de la chaîne industrielle.

Toutefois, l'industrie des métaux non ferreux en France a connu depuis plusieurs années une recomposition de ses capacités productives, laissant apparaître un effritement de la production, une baisse des effectifs et un solde déficitaire de la balance commerciale.

Cette étude, conduite dans le cadre du Pipame, porte sur les « mutations économiques du secteur de l'industrie des métaux non ferreux ». Elle procède à un diagnostic de cette industrie afin, d'une part, d'analyser les facteurs qui ont conduit à sa situation économique actuelle et, d'autre part, d'identifier les relais de croissance qui permettront d'assurer son dynamisme dans les années à venir. L'analyse tient compte des effets induits sur l'économie du secteur par l'environnement réglementaire et les innovations technologiques.

L'étude pointe certaines caractéristiques de cette industrie en France, et de son environnement de marché, qui devront être améliorées pour renforcer sa position dans un contexte de concurrence internationale qui s'intensifie. Elle fait aussi ressortir de véritables atouts susceptibles de conforter les acteurs français dans une compétition où l'innovation et l'intensité technologique s'affirmeront de façon croissante dans les années à venir comme des facteurs de succès déterminants. Dans ce contexte, onze leviers d'actions sont identifiés concernant les différents rangs de la chaîne de valeur, depuis l'extraction jusqu'à la première transformation, pour renforcer la compétitivité des entreprises.

Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique - DGE
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie - DGALN
Ministère des Affaires étrangères et du Développement international - DEEI
Commissariat général à l'Égalité des territoires (CGET)
Association Française de l'Aluminium (AFA)
Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M)

**PIPAME**
Pôle interministériel de Prospective et d'Anticipation
des Mutations économiques