



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

L'AVENIR DE LA METALLURGIE FRANÇAISE

REFLEXIONS ET PISTES D' ACTIONS

Yves BRECHET

André PINEAU

Yves QUERE

SOMMAIRE

1. AVANT-PROPOS	6
2. INTRODUCTION.....	7
2.1 Le Comité d’Orientation National de la Métallurgie (CONM).....	7
2.2 Structuration du CONM et méthodologie de travail.....	8
3. STRUCTURATION DE LA METALLURGIE FRANÇAISE EN 3 PÔLES.....	9
4. DEFINITION DES PROGRAMMES PLURIANNUELS DE RECHERCHE.....	12
4.1 Etat des lieux.....	12
4.2 Recommandations	14
5. BESOINS EN RECRUTEMENT	16
5.1 Données chiffrées.....	16
5.2 Tensions sur le marché de l’emploi	16
5.3 Recommandations	17
6. EVOLUTION DES PROGRAMMES DE FORMATION	18
6.1 Evolution des méthodes de formation	18
6.2 Evolution des formations par niveau.....	20
7. IMPLICATION DES INDUSTRIELS.....	22
7.1 Signature d'accords-cadres	22
7.2 Chaires industrielles	22
7.3 Création d'un fonds pour la métallurgie au CNRS.....	22
7.4 Soutien financier du réseau.	23
8. AMELIORATION DE LA VISIBILITE DE LA METALLURGIE	24
8.1 Les enfants du primaire	24
8.2 Les Professeurs des Ecoles	24
8.3 Les élèves et les professeurs du secondaire.....	25
8.4 Le grand public.....	25
8.5 Le Parlement.....	26
9. CONCLUSIONS.....	27
10. ANNEXES	29

1. AVANT-PROPOS

Il y a quelques semaines, le Président de la République élevait Jacques Friedel à la dignité de Grand-croix de la Légion d'Honneur. Il distinguait ainsi ce grand savant qui avait donné à la Métallurgie française un lustre exceptionnel : un des rares au monde à maîtriser les caractéristiques mécaniques des métaux et des alliages aussi bien que leurs propriétés électriques et magnétiques. Bien au delà de l'Université, celui-ci avait irrigué les Institutions techniques (IRSID, CEA...) et, finalement, le monde industriel.

Il n'est pas exagéré d'écrire que la Métallurgie française a acquis une position internationalement très forte : la diminution du nombre de morts sur nos routes (résistance accrue des châssis), la variété de nos aciers spéciaux, le remarquable essor des alliages d'aluminium (intimement liés au succès d'Airbus), le succès de notre filière nucléaire, celui de l'industrie ferroviaire avec le TGV, la forte présence de notre construction navale civile et militaire ne sont que quelques-uns des signes de cette vitalité.

Malheureusement, des modes nouvelles (à commencer par l'attrait de la finance) ont éloigné bon nombre d'étudiants du domaine métallurgique, considéré à grand tort comme "vieillot".

Plus grave, la vente et/ou le démantèlement partiel de nos grandes entreprises nationales, ont lézardé en quelques années ce bel édifice. Des laboratoires universitaires ont disparu, des usines ont fermé leurs portes, entraînant chômage et perte de savoir-faire. Des entreprises ont vu leur centre de décision être délocalisés à l'étranger, et **l'avenir de notre Métallurgie se trouve désormais posé.**

Il est encore temps pour réagir. Un rapport récent des deux Académies (celle des Sciences et celle des Technologies) démontre, par ce double patronage, à quel point ce sujet est partagé par les deux domaines : l'académique et l'industriel. Ce rapport a établi un diagnostic et formulé plusieurs recommandations qui ont reçu un écho tel, qu'en 2012, le Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a décidé la création d'un *Comité d'Orientation Nationale de la Métallurgie (CONM)*, regroupant des personnalités issues des domaines de la recherche, de l'enseignement et de l'entreprise, et dont on lira ci-après les recommandations et les conclusions issues de ses travaux de réflexion.

Au cours des siècles passés, de grands scientifiques et des industriels inspirés et audacieux ont fait de notre pays un des leaders mondiaux dans le domaine de la métallurgie : source d'emplois, d'exportations et de recherches scientifiques et technologiques. Prenons conscience de ce que les "réflexions et pistes d'action" présentées ci-après donnent une chance, à l'ensemble de l'édifice, d'être restauré et revitalisé et remercions les membres du CONM pour leur implication et leur contribution à ce projet de renaissance de la métallurgie française.

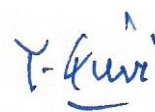
Yves BRECHET



André PINEAU



Yves QUERE



2. INTRODUCTION

Par Courrier du 18 Avril 2012 (Annexe 1) adressé aux membres de l'académie des Sciences et de l'académie de la Technologie auteurs du rapport « La métallurgie, science et ingénierie », le Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a donné son aval à la création d'un Comité National d'Orientation de la Métallurgie ayant pour missions :

- La définition des programmes pluriannuels de recherche ;
- la quantification sur 3 à 5 années glissantes, des besoins de recrutement des entreprises et des organismes de recherche ;
- la définition des programmes de formation (initiale ou continue) correspondants ;
- la rédaction d'un rapport annuel d'orientation destiné au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche ainsi qu'au Ministère de l'Industrie.

Ces missions, données au CNOM par son prédécesseur ont été confirmées par la Ministre actuellement en exercice, lors d'un entretien qui s'est tenu au MESR en décembre 2012 ce qui montre à l'évidence l'importance de ce sujet pour l'avenir de notre pays.

En effet, la métallurgie est vitale pour un certain nombre d'industries stratégiques de notre pays (automobile, aéronautique, ferroviaire, nucléaire, armement,...). Le rapport des deux académies pointe plusieurs faiblesses dans la situation de la métallurgie française actuelle.

- Les centres de décision des grands groupes du secteur sont pour la plupart installés à l'étranger.
- L'enseignement de la métallurgie a disparu de la plupart des formations de l'enseignement supérieur.
- Le renouvellement des chercheurs se fait attendre.
- La CNI n'a pas considéré la métallurgie comme devant être un axe stratégique.

2.1 Le Comité d'Orientation National de la Métallurgie (CONM)

Afin de pouvoir bénéficier d'un maximum d'éclairages sur les différentes missions qui lui ont été confiées, le CONM a été constitué de 21 membres, représentant les différents acteurs intervenant dans le domaine de la métallurgie en France : entreprises, enseignants, administrations, syndicats professionnels et organismes de recherche (voir composition du CONM en annexe 2).

2.2 Structuration du CONM et méthodologie de travail

Compte-tenu de la diversité des thèmes à étudier, le CONM a décidé de créer 6 groupes de travail, chacun prenant en charge une thématique bien précise :

- Structuration de la Métallurgie française en 3 pôles ;
- définition des programmes pluriannuels de recherche ;
- besoins en recrutement ;
- programmes de formation ;
- implication des entreprises ;
- visibilité de la métallurgie.

Les 21 membres du CONM se sont donc répartis entre les 6 groupes de travail selon le tableau de l'Annexe 3.

Le CONM s'est réuni 4 fois en séances plénières afin d'orienter les réflexions des 6 groupes de travail et valider les conclusions et propositions de ceux-ci, qui sont l'objet du présent rapport.

3. STRUCTURATION DE LA METALLURGIE FRANÇAISE EN 3 PÔLES

Il s'agit de structurer la communauté des métallurgistes pour travailler mieux ensemble, dégager des synergies et permettre une revitalisation de cette discipline sans pour autant recourir à des demandes systématiques de moyens supplémentaires.

Pour cela, la communauté doit se présenter de façon lisible afin de montrer sa détermination à relever de façon coordonnée les défis scientifiques et industriels qui lui font face, dans un contexte économique et budgétaire difficile.

Il est proposé de confier des responsabilités à trois pôles structurants tels que définis dans le tableau ci-après, en établissant également une liste de centres d'excellence importants au plan national et non directement liés aux trois pôles.

Localisation géographique	Dominante du pôle	Domaines d'excellence reconnus
Pôle Lorrain Metz - Nancy, Belfort.	Métallurgie de l'élaboration et de la transformation	- métallurgie extractive - élaboration - solidification - traitements thermiques - traitements de surface - très grandes déformations et usinage
Pôle Sud Est Grenoble-Lyon, St Etienne.	Métallurgie physique (structure des alliages)	- transformations de phases - physique de la plasticité - utilisation des grands instruments
Pôle Ile-de-France	Métallurgie mécanique (propriétés mécaniques des alliages)	- mécanique de la rupture et de l'endommagement - formulation de nouveaux alliages - comportement sous irradiation - fatigue thermomécanique

Recommandations

1. Le CONM propose de créer un « *réseau national de la métallurgie* ».

Afin d'éviter la création d'une nouvelle structure et de façon finalement assez naturelle, le réseau sera géré comme une commission de la société française de métallurgie et de matériaux (SF2M). Il disposera d'un secrétariat général composé d'un cadre et d'une assistante, chacun à mi-temps, et il sera géré par un bureau rendant compte de ses activités au CONM.

Ce réseau sera chargé de l'animation de la communauté, en s'appuyant sur les 3 pôles ainsi que sur les centres d'excellence. Un soutien financier, panachage de contributions des industriels et

d'institutionnels, sera nécessaire pour assurer ce fonctionnement, pour un budget annuel minime. Ce point est présenté dans le cadre du chapitre « implication des industriels ».

2. La communauté scientifique de la métallurgie doit se structurer de façon lisible vis-à-vis des différents acteurs de la métallurgie, tant du point de vue académique qu'industriel.

2.1. Les Pôles reçoivent donc une mission importante de structuration de la communauté en raison de leur taille et de leur histoire.

Au-delà de ces trois pôles, le CONM a essayé de répertorier chacune des équipes françaises travaillant dans le domaine de la métallurgie. Deux réunions rassemblant une très grande proportion des équipes françaises ont été organisées. Un « diagramme ternaire de la métallurgie » en France a été réalisé où les équipes se sont positionnées elles-mêmes (Voir Annexe 4). La présentation des différentes équipes est consultable sur le site de la SF2M.

2.2. L'évolution future des compétences ne peut être décidée de façon centralisée. Elle ne peut naître que d'un dialogue ouvert dans le cadre de relations confiantes sur la durée. Les pôles structurants acceptent de concentrer leurs efforts sur les thématiques définies dans le tableau ci-dessus.

Les centres d'excellence, répartis sur tout le territoire, permettront de maintenir un enseignement de haut niveau de la métallurgie en s'appuyant sur les synergies dégagées dans le réseau. Sur le plan scientifique, la thématique de ces centres d'excellence devra tenir compte, à la fois, des objectifs des communautés territoriales auxquelles ils appartiennent et d'une logique de structuration nationale des compétences.

3. Les missions de ce réseau seront d'organiser la communauté afin de mettre en place les actions affichées ci-dessous.

3.1. Actions de formation

- Mettre en place des actions de « formation des formateurs ». Ce type d'action à organiser de façon concertée entre les trois pôles et certains centres d'excellence, apparait assez clairement. On imagine que chacun des pôles désigne une personne chargée de ces aspects de formation de façon à organiser des écoles d'été, ciblées vers la formation des formateurs au niveau Doctorat, Master et Licence. Cette action a, de facto, commencé, grâce au CNRS dans le cadre de « journées nationales de formation ».
- Rédiger de façon coordonnée, des ouvrages de référence (« text books ») pour ces différents niveaux.
- Mettre en place des formations coordonnées au niveau des second et troisième cycles, avec des cours partagés à distance, et des semaines de formations communes entre divers sites. La métallurgie pourrait déposer une proposition de projet à la procédure « université numérisée » qui est en cours de mise en place.

- Vis-à-vis des formations en BTS, IUT, Licences Professionnelles, etc. Il faudra repérer celles qui sont pertinentes par rapport à ce projet de revitalisation de la métallurgie. Dans un premier temps, il faudra s'adresser aux formations des IUT et License pro qui sont déjà dans les pôles et dans les centres d'excellence.

3.2. Actions de communication

- Mettre en place un réseau d'étudiants en master, de doctorants et de post-doctorants permettant de reconstituer un vivier de recrutement pour l'industrie aussi bien que pour le monde académique.
- Mettre en place un portail internet partagé rassemblant les formations, les diplômés, les employeurs. On s'appuiera sur l'existant en l'adaptant aux besoins de cette communauté.
- Renforcer et coordonner des actions communes avec les établissements publics de recherche concernés par la métallurgie (CEA, ONERA, ...), ainsi qu'avec certains grands industriels : prévoir des visites en partant de la liste des actions existantes. Chaque pôle devra désigner un responsable pour les relations avec les industriels et de tels établissements publics orientés vers la recherche technologique.
- Soutenir les actions définies dans le chapitre « visibilité de la métallurgie ».

3.3 Actions de coordination

Il est indispensable de coordonner la reconstruction de l'offre de formation et de recherche, en termes de moyens et de postes, afin d'assurer une complémentarité des activités. Dans cette perspective, il est nécessaire que :

- Les centres d'expertise se coordonnent avec un ou plusieurs pôles, suivant leurs thématiques scientifiques principales.
- Des discussions régulières sur les actions coordonnées à mener en matière de recherche et d'enseignement aient lieu au niveau des pôles.
- L'approche européenne devienne une priorité, afin de devenir des acteurs incontournables d'un réseau européen, couplant fortement la recherche et la formation et répondant aux enjeux industriels. En se groupant en 3 Pôles plus les centres d'expertise, il est sans doute possible de développer un lobbying à Bruxelles, représentant la métallurgie française et coordonné avec l'existant (représentants CNRS, CEA, etc...)

Une meilleure structuration permettra donc de positionner les moyens de façon adéquate sur le territoire national et, ainsi, de dégager des réserves de productivité. Elle impliquera tout autant une évolution des mentalités dans un souci d'efficacité, qu'un renforcement des moyens.

4. DEFINITION DES PROGRAMMES PLURIANNUELS DE RECHERCHE

4.1 Etat des lieux

Les industries stratégiques françaises (aéronautique, automobile, ferroviaire, nucléaire, armement,...) font largement appel aux produits de la métallurgie. Les matériaux métalliques évoluent en permanence, des nouvelles nuances plus performantes ont été inventées et utilisées ces dernières années, et la compétition mondiale est très active dans ce domaine. Le potentiel de progrès est encore important, y compris avec des ruptures très innovantes dans la conception métallurgique des matériaux ou dans leur mise en œuvre.

Cela est vrai à la fois pour les alliages à très haute performance requis par l'aéronautique, ou des alliages à plus grande diffusion comme ceux de l'automobile, de l'emballage ou de la construction. Cela demeure vrai dans des domaines où la qualité doit être impérativement garantie comme dans le nucléaire. Il est donc indispensable de maintenir un haut niveau de recherche dans ce domaine.

Il est donc proposé un programme de recherche associant une finalité industrielle forte et une capacité de ressourcement en recherche fondamentale structurante pour la communauté.

Les **compétences** indispensables à une recherche de qualité, sont définies dans les tableaux ci-dessous qui en donnent une définition, et en dressent l'état des lieux, très variable d'une compétence à l'autre.

Compétences	Définition
Métallurgie extractive / recyclage (1)	Technologies pour passer du minerai au métal, ou pour récupérer des alliages et les recycler
Métallurgie de la formulation (2)	Recherche de nouvelles compositions d'alliages métalliques
Métallurgie de l'élaboration (3)	Passage du métal fondu au lingot. Métallurgie des poudres. Fonderie
Métallurgie de la transformation (4)	Passage du lingot au semi-produit (tôles, plaques, barres, forgés, matricé, extrudés ...)
Métallurgie physique (5)	Maîtrise des microstructures des alliages en fonction des traitements thermomécaniques appliqués
Métallurgie mécanique (6)	Maîtrise des propriétés mécaniques (monotones et cycliques) et de la mise en forme des alliages
Propriétés d'usage (7)	Maîtrise de la relation entre les microstructures et les propriétés (mécanique, thermique, physiques)
Tenue aux agressions de l'environnement (8)	Corrosion sous toutes ses formes, oxydation, couplage avec les autres propriétés d'usage des composants
Assemblage (9)	Technologies pour assembler les pièces métalliques (soudage, rivetage...)
Traitement de surface (10)	Technologies de revêtement et de modification des surfaces dans un but de protection vis-à-vis de la corrosion, de la fatigue, de l'usure
Métallurgie spéciale (11)	Métallurgie de certains domaines très particuliers qui, en plus des connaissances générales de la métallurgie, nécessitent des connaissances très spéciales, par exemple dans le nucléaire la tenue sous irradiation

Compétences	Etat des lieux
Métallurgie extractive / recyclage (1)	Compétences devenues rares et souvent sous-critiques
Métallurgie de la formulation (2)	Domaine sinistré
Métallurgie de l'élaboration (3)	Compétences souvent devenues sous-critiques.
Métallurgie de la transformation (4)	Manque de couplage entre les aspects technologiques et les aspects scientifiques
Métallurgie physique (5)	Domaine très bien développé en France
Métallurgie mécanique (6)	Domaine très bien développé en France
Propriétés d'usage (7)	Domaine très bien développé en France
Tenue aux agressions de l'environnement (8)	Compétence très dispersée en France, collaboration insuffisante entre les différents secteurs disciplinaires
Assemblage (9)	Domaine dominé par les aspects procédés, aspects modélisation et métallurgie du soudage, aspect propriétés insuffisamment développés
Traitement de surface (10)	Couplage insuffisant entre les procédés de traitement de surface, les propriétés obtenues et les raisons de ces propriétés
Métallurgie spéciale (11)	Métallurgie nucléaire : bien développée, mais menacée, Métallurgie des matériaux fonctionnels : à développer

4.2 Recommandations

Il devient indispensable de lancer des programmes de recherche finalisés, qui permettent **une implication forte du monde industriel**, et que ces programmes servent aussi de **plateforme pour maintenir et développer les compétences fondamentales** indispensables dans la durée pour garder un capital fort d'innovation.

Six sujets ont été identifiés comme **prioritaires** compte tenu du tissu industriel. Ces sujets sont déclinés dans le tableau ci-dessous avec en regard les compétences fondamentales indispensables à leur réalisation. En structurant ainsi le programme de recherche, on conserve à la fois une grande réactivité pour les actions en liaison étroite avec l'industrie, et une recherche fondamentale solide et construite dans la durée.

<i>Sujets prioritaires</i>	<i>Compétences Requises</i>
Procédés spéciaux pour le recyclage des métaux,	1, 2, 3, 4
Métallurgie fondamentale pour la formulation et l'élaboration d'alliages innovants	2, 5, 6
Métallurgie des procédés de fabrication et de mise en œuvre	3, 5, 6
Métallurgie pour l'allègement dans les transports	4, 5, 6, 7, 9,10
Métallurgie pour les matériaux en conditions extrêmes	3, 4, 5, 6, 7, 8, 10,11
Métallurgie des matériaux fonctionnels	2, 5, 6, 7,8, 11

- Ces programmes de recherche devront être portés conjointement par les universitaires et les industriels et contribuer à la structuration de la communauté en impliquant des équipes des différents pôles et centres. Une série d'exemples d'action dans chacun de ces programmes est donnée en Annexe 5.
- Les moyens expérimentaux de la communauté devront être mis en réseau : c'est déjà le cas pour les équipements de microscopie électronique à transmission, pour les appareillages d'essais in situ en Microscopie Electronique à balayage.
- La communauté de science des matériaux est fortement impliquée dans les grands instruments (réacteurs à neutron, rayonnement synchrotron) : une telle implication est très structurante.
- Ainsi, le projet d'EQUIPEX HERMES qui fédère l'ensemble de la communauté autour du rayonnement synchrotron, pour des techniques expérimentales et des alliages très variés, sera un atout majeur.
- Quelques exemples de déclinaison de la stratégie en six programmes s'appuyant sur les 11 compétences fondamentales sont donnés en Annexe 5 de ce rapport. Ces exemples ont pour seule fonction d'illustrer le propos et de montrer le caractère générique et fédérateur de la méthode proposée. Dans la plupart des exemples sont identifiés les industriels partenaires potentiels. Les exemples donnés sont spécifiques et peuvent être déclinés différemment en terme de partenaires industriels et de matériaux concernés, mais la structure de recherche est proposée : une thématique de recherche en lien étroit avec les industriels, et qui incorpore dans ses activités la recherche en amont en termes de compétences.

5. BESOINS EN RECRUTEMENT

5.1 Données chiffrées

Une étude prospective sur l'évolution des emplois et des métiers de la métallurgie a été réalisée en 2012 pour l'Observatoire de la Métallurgie¹ afin d'anticiper les besoins en compétences à l'horizon 2015-2020. Il en ressort que :

- L'ensemble des secteurs de la métallurgie qui **recouvrent la fabrication et l'utilisation des métaux représente 1,5 millions d'emplois** ;
- **les prévisions de recrutement resteront à un niveau élevé** : de 115 000 à 128 000 par an d'ici 2020 suivant les scénarii économiques ;
- dans le seul secteur « métallurgie et fabrication de produits métalliques », 31 500 recrutements sont prévus en 2020 ;
- **une hausse des besoins est prévue pour les catégories ingénieurs et cadres techniques** (23 660 en 2020 soit +10% par rapport à 2010) et techniciens et agents de maîtrise (20360 soit + 3,8% par rapport à 2010) alors que la baisse des besoins de recrutement concerne essentiellement les ouvriers non qualifiés (21 720 en 2020 soit - 40% par rapport à 2010).

Il n'existe pas de statistiques plus précises sur les besoins de recrutement dans les domaines de compétences scientifiques et techniques de la métallurgie telle que définies dans le rapport des Académies des Sciences et des Technologies.

5.2 Tensions sur le marché de l'emploi

Quelques domaines de compétence ne posent pas de problème particulier comme la modélisation numérique et la simulation des procédés. Il est par contre moins aisé de trouver des expérimentateurs pour des procédures d'essais de plus en plus complexes. **Ainsi, il est de plus en plus difficile de recruter des ingénieurs métallurgistes** en particulier suite à la disparition des options métallurgie dans beaucoup d'écoles d'ingénieurs. Il y a clairement un problème d'attractivité de la métallurgie auprès des étudiants et une désaffection plus générale pour l'industrie. Cependant, une enquête récente de l'association Ingénieurs et Scientifiques de France montre un certain regain d'intérêt des jeunes diplômés pour l'industrie depuis 2008.

¹ Organisme créé dans le cadre de la Commission Nationale Paritaire de l'Emploi (CNPE) de la Métallurgie

Les industriels **rencontrent par ailleurs de grandes difficultés pour trouver des techniciens et techniciens supérieurs pour remplacer les anciens bac +2**. Les diplômés des IUT s'orientent aujourd'hui massivement vers la poursuite d'études longues et les BTS n'ont pas toujours le niveau général requis par l'évolution des technologies et les licences professionnelles ne sont pas assez connues. Cette situation incite beaucoup d'industriels à recruter des ingénieurs pour ce type de postes ce qui pose des problèmes d'évolution de carrière et de pérennité de l'expertise.

Quelques métiers sont particulièrement en tension comme le soudage, la fonderie ou les traitements de surface pour lesquels il y a de réelles difficultés de formation et de recrutement.

5.3 Recommandations

Il est indispensable pour mieux cerner les besoins prévisionnels de recrutement et de formation d'affiner les enquêtes en cours en introduisant les compétences métallurgiques nécessaires aux différents métiers industriels. Nous proposons que l'Observatoire National de la Métallurgie inscrive très prochainement cette analyse dans son programme d'études.

Une action de communication de grande ampleur est par ailleurs nécessaire pour mettre en valeur la place de la métallurgie dans toutes les filières industrielles et montrer la diversité des débouchés des industries de fabrication et d'utilisation des métaux comme le propose le chapitre « visibilité de la métallurgie ».

6. EVOLUTION DES PROGRAMMES DE FORMATION

La métallurgie est une science devant « être enseignée comme un corpus ayant une logique interne » en considérant :

- la formation de spécialistes (techniciens, master/ingénieurs, docteurs),
- la formation générale au niveau ingénieur,
- la formation des techniciens

A partir de ce constat, le CONM propose plusieurs pistes de réflexion tant sur les méthodes de formation que sur les différents publics visés :

- Spécialistes en métallurgie vs. utilisateurs (conception, bureau d'études...)
- Experts vs. managers techniques
- Ingénieurs vs. techniciens supérieurs
- Formation initiale vs. formation continue

6.1 Evolution des méthodes de formation

Éléments de comparaison avec l'étranger

La formation française a un côté « rigide », souvent construit sur le triptyque cours-TD-TP, avec une absence de connexion entre les disciplines. A l'instar des pays anglo-saxons, l'enseignement en métallurgie devrait promouvoir la formation par projets, tirant utilement bénéfice d'un encadrement plus proche des étudiants, tout en leur laissant une part d'initiative importante dans l'acquisition des connaissances de base. Dans cette optique, la combinaison d'un système plus flexible et de méthodes d'enseignement renouvelées doit permettre d'approfondir les liens entre la métallurgie et les autres disciplines.

Par rapport à l'Allemagne, à l'Angleterre et aux USA, on note également une faible implication des sociétés savantes et professionnelles dans la formation, ce qui ne permet pas de tirer tout le parti d'une implication des industriels en lien étroit avec les enseignants.

Evolutions des méthodes de formation en métallurgie

L'enseignement en métallurgie peut tirer un meilleur parti de la diversité de documents concernant les matériaux sur Internet, à condition d'exercer un œil critique. Une action du réseau sera de **proposer aux enseignants et aux étudiants un accès à des cours en ligne via un portail dédié.**

D'autre part, l'enseignement des matériaux doit être présenté comme un exemple pédagogique où la formation suit une démarche de projet, part du design pour arriver à la science, fait interagir les disciplines différentes, propose des supports originaux et partagés... Cette approche doit être étendue plus largement dans les universités françaises et introduite de façon généralisée dans les écoles d'ingénieur, faisant ainsi de la métallurgie le fer de lance d'une nouvelle méthodologie

d'enseignement. L'organisation en France et en français de séminaires de formation encouragerait les jeunes enseignants-chercheurs à essayer de nouvelles idées et pousserait l'ensemble des enseignants du supérieur à mieux partager les ressources de formation.

Enfin, il est nécessaire de renforcer les liens entre l'enseignement sur les matériaux structuraux et les matériaux fonctionnels, ainsi que sur les interactions entre les différentes propriétés. On ressent, entre autre, le **besoin pour un nouvel ouvrage de référence sur les matériaux fonctionnels**, dont la rédaction serait l'occasion pour quelques jeunes chercheurs français de coopérer pour une telle production.

Recommandations

La structuration de la métallurgie en réseau national facilitera la mutualisation des moyens d'enseignement et le partage des bonnes pratiques. Quelques suggestions sont faites en ce sens :

- désigner un correspondant « formation » par site, ayant une formation en métallurgie et faisant diffuser l'information et les outils de formation en local,
- mettre en place un site Intranet dédié à la formation avec cours en ligne, suggestion d'exercices, de projets, etc... dans le cadre d'un portail internet métallurgie,
- faire intervenir des professeurs invités étrangers au niveau master-doctorat,
- construire des séminaires internationaux destinés aux masters et aux doctorants (possibilité de financements européens dans le cadre des programmes doctoraux).
- mutualiser des moyens de formation avec les pays limitrophes : le réseau a tout intérêt à interagir avec les collègues des pays limitrophes, tirant parti des outils Européens d'aide à la mise en place d'actions communes. Les échanges et les coopérations internationales doivent conduire chacun à contribuer autour de ses points d'excellence. A partir de ce constat, il est possible d'émettre quelques propositions :
 - Partage et mutualisation d'outils et de documents de formation communs, les collègues étrangers pouvant devenir partenaires associés du réseau national ;
 - séjours longs à l'étranger pour les étudiants, hors d'un système contraignant de double diplôme, permettant d'acquérir des compétences complémentaires auprès des meilleurs spécialistes d'un domaine ;
 - mise en place d'écoles d'été européennes sur des thèmes spécifiques ;
 - création d'un forum annuel sur les matériaux permettant de sensibiliser la communauté sur les changements dans le domaine et leur impact sur la formation.

6.2 Evolution des formations par niveau

Formation des spécialistes et experts en métallurgie

La formation d'experts au niveau ingénieur, master, et docteur, doit s'appuyer sur les 3 Pôles de façon à l'associer étroitement à la recherche de haut niveau dans ce domaine. Ces formations doivent être dimensionnées en fonction des besoins anticipés par le marché de l'emploi en métallurgie.

Les différents Pôles, avec l'appui des centres d'excellence, devront coopérer afin de proposer des formations complètes : cours en ligne et/ou en visioconférence, échange d'enseignants, invitation d'enseignants étrangers reconnus dans des domaines spécifiques, organisation de stages au niveau master et doctorat.

Formation des ingénieurs généralistes

L'enseignement de la métallurgie doit être réintroduit comme un élément essentiel de la formation d'ingénieur. Dans cet esprit, il faut s'appuyer largement sur les méthodes modernes de choix des matériaux qui permettent aux élèves ingénieurs d'apprendre les bases de la métallurgie et de la science des matériaux afin qu'ils puissent apporter de l'innovation dans la conception des équipements industriels en combinant procédés et matériaux, et structure/design et matériaux. Cette formation doit se faire sur une base inductive. L'enseignement de la métallurgie mettra en avant de nouveaux modes de formation où l'enseignement par projet jouerait un rôle prépondérant. Pour ce faire, il est primordial de prévoir des « formations de formateurs » afin de donner les moyens aux enseignants des écoles d'ingénieurs d'atteindre les objectifs visés. En ce sens, les 3 Pôles doivent proposer des formations, complétées par la mise à disposition de cours/formations, ainsi que d'éléments d'exercices.

Formation des techniciens supérieurs

Des actions de sensibilisation doivent être menées auprès des enseignants de BTS, et d'IUT. Pour ce faire, il est indispensable que ces enseignants puissent libérer du temps afin d'aller dans les laboratoires de métallurgie, industriels et académiques. Ces « stages » sont autant d'occasion de se former et de s'informer sur les évolutions et les innovations en métallurgie et d'actualiser les enseignements.

Si les formations Bac+2 restent assez générales dans le domaine de la métallurgie et des matériaux du fait des variations d'embauches dans les différents secteurs économiques, il est possible d'envisager une spécialisation au niveau de licences professionnelles en métallurgie (6 mois de cours et 6 mois de stage). En adossant ces licences au réseau, il sera possible de répondre à la demande industrielle avec réactivité, en conservant de la souplesse sur le nombre de diplômés et sur leurs domaines d'expertise.

Formations par alternance et par apprentissage

La formation par apprentissage est essentielle aux différents niveaux de formation. Les étudiants en contact direct avec les entreprises découvrent l'intérêt de ce secteur, son caractère innovant, et l'actualité de son activité. Le renforcement de la formation par apprentissage implique toutefois d'adapter les moyens d'enseignement associés dans la mesure où il est fréquemment nécessaire de dédoubler les cours pour tenir compte des contraintes spécifiques de ce mode de formation.

Le réseau doit jouer un rôle de coordination entre les différentes formations par apprentissage afin de profiter au mieux de la proximité géographique des entreprises, des compétences des différents pôles et centres d'excellence, et de réduire ainsi la dispersion des enseignements et les besoins en ressources complémentaires.

Formation continue

Actuellement, la formation continue qualifiante existe dans certaines universités, mais est surtout pilotée par le CNAM-CACEMI. En s'appuyant sur l'existant, le réseau national peut renforcer les liens entre les antennes régionales CNAM, les universités et les écoles. La force du réseau et sa proximité permettront de toucher les PME locales et de redynamiser le tissu industriel.

Un recensement régulier est nécessaire au niveau des entreprises, y compris des entreprises utilisatrices de matériaux qui semblent actuellement avoir le plus de besoin en compétences métallurgiques. On voit dès à présent émerger deux types de besoins :

- Des formations sur des thématiques spécifiques, comme le soudage (avec l'Institut de Soudure), la fonderie (avec le CTIF) ou les traitements de surface, pour former des experts au niveau technicien supérieur – ingénieur ;
- des formations sur des sujets « génériques » : recyclage, durabilité, ...

Ces formations pourraient se dérouler autour de programmes d'une semaine, tout en développant de nouvelles voies d'enseignement à distance.

Pour la formation des experts, le CNRS et de nombreuses universités sont bien organisés pour proposer des formations. L'intérêt du réseau est de recenser et faire connaître ces formations, et de recueillir les besoins en formations complémentaires. Ces formations seront complétées par un approfondissement des liens entre l'industrie et l'université en mettant en place des séjours croisés en entreprises pour les enseignants et en laboratoires académiques pour les ingénieurs, ainsi qu'en proposant des Ecoles d'été communes aux deux publics.

7. IMPLICATION DES INDUSTRIELS

Les industriels sont au premier chef intéressés par une métallurgie forte et innovante sur le territoire national. Leur implication dans le dispositif est nécessaire et il convient de préciser qu'elle n'est pas nouvelle.

Les industriels de la métallurgie, notamment les grandes entreprises tant au niveau de l'élaboration que de la mise en forme ou de l'utilisation d'alliages métalliques ont depuis longtemps fait appel aux compétences académiques. Des collaborations bilatérales entre une entreprise et un centre de recherche et de formation sont régulières et le développement de programmes collaboratifs financés pour partie sur des fonds publics (ANR Programme Matetpro, FUI, PCRD) a conduit à un élargissement des consortiums. A ce titre, trois IRT ont actuellement des activités importantes dans le domaine : M2P, Saint-Exupery et Jules Verne.

Il est important de conserver toutes ces initiatives individuelles de façon très décentralisée (tant au niveau des chercheurs que des industriels). Cependant ces relations sont par nature changeantes et sont soumises aux aléas de la conjoncture. Le présent contexte pourrait être utilisé pour structurer un certain type de relations et les inscrire dans la durée afin de maintenir des compétences de qualité dans les établissements d'enseignement supérieur, malgré les difficultés budgétaires et les effets de mode tout en faisant face à d'éventuels retournements économiques, ...

7.1 Signature d'accords-cadres

Un des freins identifié est lié à la difficulté pratique de conclure des contrats, non pas pour des raisons financières, mais pour des raisons juridiques, en particulier du fait des clauses de propriétés intellectuelles et industrielles. Si les établissements d'enseignement supérieur en acceptent le principe, la négociation d'accords-cadres entre un partenaire industriel, le CNRS et ces établissements pourrait représenter un gain de temps considérable.

7.2 Chaires industrielles

La création de chaires industrielles au sein des établissements d'enseignement supérieur se développe. Leur mise en place au sein de fondations des universités par le soutien des industriels du secteur pourrait permettre de lancer tout type d'action souhaitée conjointement, dans la mesure des ressources disponibles. Le réseau aura ainsi un rôle d'incitation et de coordination.

7.3 Création d'un fonds pour la métallurgie au CNRS

Le principe de ce fonds s'apparente en quelque sorte à des chaires "métallurgie" sans mention du nom d'un industriel particulier, délocalisées et utilisables dans tous les laboratoires du territoire national (y compris éventuellement dans certains qui ne seraient pas affiliés au CNRS).

Sa création marque l'intérêt du CNRS pour le maintien à haut niveau de compétences de recherche dans cette discipline. L'abondement de ce fonds se ferait à partir d'une contribution de différents

partenaires privés ou publics. Les versements effectifs des partenaires ne seront effectués que lorsqu'un problème de maintien des compétences sera détecté par une part importante des partenaires au cours d'une année donnée. En ce qui concerne le CNRS, l'abondement se fera via l'Institut de Chimie². Le mode de fonctionnement de ce fonds serait géré par une convention entre le CNRS et les industriels souhaitant s'associer. L'utilisation des moyens serait proposée à un comité de suivi issu du CONM composé de représentants d'industriels cotisants, de représentants académiques et du CNRS. Différents modes d'intervention sont envisageables pour soutenir les compétences, suivant la nature exacte du problème diagnostiqué en commun, par exemple :

- Mise en place de projets de recherche amont, transverses à plusieurs industriels ;
- accompagnement de l'accueil de nouvelles équipes au sein d'un laboratoire ;
- renforcement de compétences critiques - création de chaires industrielles ;
- ...

Ce fonds n'a pas vocation, sauf cas critique, à se substituer à des contrats de collaboration de recherche entre un seul laboratoire et un seul industriel, dont l'activité décentralisée doit, au contraire, être encouragée.

Il présente l'avantage de favoriser la mise en réseau en permettant un renforcement des liens entre les académiques (via le CNRS et ses unités mixtes) et les industriels du secteur. Il permet de lever une contribution du CNRS, qui serait très difficile à mettre en place dans un autre contexte. L'embauche éventuelle de personnel pourra se faire via le CNRS, ce qui reste "neutre" par rapport aux industriels et s'impose dans des projets transverses. Une fois le principe des actions arrêté (donc budgétisé), le fonds peut être très réactif pour la mise en place des actions et évite des appels à projets ou à candidature qui nécessitent des délais longs.

7.4 Soutien financier du réseau

Le réseau, mis en place sous forme d'une commission de la SF2M, nécessite également un financement particulier. Ceci se fera au travers une cotisation spécifique pour participer aux activités de cette commission. Cette cotisation s'adressera aux partenaires industriels et aux laboratoires académiques ayant la volonté de s'inscrire dans les actions du réseau.

² Pour fixer un ordre de grandeur l'abondement CNRS pourrait être de l'ordre de 100 à 200 k€ en régime de croisière, avec un principe d'abondement du double des industriels. La contribution d'un industriel pourrait être de l'ordre de 50 k€ (modulable selon la taille). Des abondements par d'autres partenaires publics sont également envisageables.

8. AMELIORATION DE LA VISIBILITE DE LA METALLURGIE

Le slogan publicitaire bien connu : « nous avons un savoir-faire, il faut le faire-savoir », prend toute son importance en ce qui concerne la métallurgie.

Vis-à-vis du grand public, cette science plusieurs fois millénaire, jouit au mieux d'une image passéiste et au pire est associée aux problèmes qui ont affecté la sidérurgie Lorraine au cours des 30 dernières années.

L'amélioration de sa visibilité passe donc par des actions ciblées auprès de différents publics :

- Les enfants du primaire
- Les professeurs des Ecoles
- Les élèves et les professeurs du secondaire
- Le grand public
- Le Parlement

8.1 Les enfants du primaire

- Susciter quelques planches dessinées dans des journaux comme « Pomme d'api... ».
- Prendre contact avec des concepteurs et/ou des fabricants de jouets pour en réaliser (genre Monopoly, ou autres) qui aient trait aux métaux dans la vie courante, et notamment leurs noms (fer, nickel, plomb, or, argent...).

8.2 Les Professeurs des Ecoles

- S'appuyer sur les opérations comme « *La main à la pâte* » qui a publié un certain nombre de documents qui aident les Professeurs des Ecoles dans leur retour à la science et à la technique. On peut imaginer un tel document qui traiterait, d'extrêmement simple façon les grands « âges » (du bronze, du fer...); les propriétés des matériaux, leur élaboration et leur récupération; les transformations; les alliages (orfèvrerie, bronze, laiton, alliages d'aluminium); puis les usages de grande ampleur (bâtiment, automobiles, avions, bateaux, ustensiles de cuisine, outils...); et enfin les métiers et les besoins de recrutements. La rédaction sera faite en sorte que les instituteurs puissent trouver là matière à se cultiver eux-mêmes sur un sujet qu'ils n'ont jamais appris, trouver des exemples à donner et des expériences simples à faire réaliser aux enfants dans le cadre de *La main à la pâte*.
- Favoriser la visite de sites industriels par les professeurs des écoles en stage dans les ESPE (ex IUFM), comme ceci a pu être fait avec l'IUFM d'Étiolles et la Snecma (2013) ou encore, plus récemment (2014) avec Manoir-Industries.
- Etudier comment il est possible de s'appuyer sur des sites web industriels pour illustrer les applications, voire la nature des métiers.
 - S'appuyer sur le réseau des *maisons des sciences* en cours de constitution.

8.3 Les élèves et les professeurs du secondaire

- Pour le collège, le document précédent devra être rédigé en sorte de pouvoir couvrir les programmes actuels des classes EIST de 6^{ème} (programme : la matière et les matériaux) et de 5^{ème} (programme : l'énergie).
- Pour les élèves du collège, proposer des interviews à des journaux comme « Le monde des adolescents ».
- Pour le lycée, s'insérer dans les programmes de 1^{ère} et de terminale (physique, chimie, techno) et élaborer, pour les professeurs, des petits textes collant au dit programme et traitant de métaux et d'alliages. On en profiterait pour décrire à leur intention les grands thèmes de la métallurgie moderne et les différents métiers auxquels les jeunes peuvent accéder.
- Rédiger des articles simples et résolument modernes dans des revues de profs comme le Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie (UDPPC) et de chimie.
- Mener l'ensemble de ces opérations en concertation avec les inspecteurs généraux de sciences et de technologie.
- Organiser avec l'UIMM et les industriels (dans un 1^{er} temps ceux qui sont membres du CONM) tout un cycle de visites de sites industriels pour des classes de 1^{ère} et terminale des villes proches, en soignant la qualité de l'accueil (salles modernes, ingénieurs charismatiques, visions spectaculaires...).
- Réaliser, avec l'aide de professionnels, un film de belle qualité esthétique, sur la métallurgie – du microscope électronique aux rails de TGV – destiné aux lycées. La projection de ce film serait commentée par un métallurgiste susceptible de répondre aux questions des jeunes et/ou des professeurs. Cette projection pourrait être suivie d'une compétition au cours de laquelle, les élèves raconteraient ce qu'ils ont retenu de ce film. La meilleure copie à l'échelle nationale recevrait alors un des Prix "jeunes" de la SF2M.

8.4 Le grand public

- « *La main à la pâte* » a bénéficié, pendant 2 ans, d'une excellente émission (chaque jeudi un "2 minutes" répété en boucle dans la journée, sur France-info) sur les expériences de classe présentées par des instituteurs et cela a beaucoup participé à la notoriété de cette opération. Sur ce modèle, on peut envisager de faire la même chose chaque fois qu'un exemple sera donné d'une découverte récente, d'un procédé original, d'un usage inattendu..., relatif à la métallurgie. Bien sûr, la composante « emploi » sera naturellement invoquée.

- Songer à monter des opérations de promotion de la métallurgie, comme une exposition des plus belles micrographies sélectionnées par la SF2M autour du jardin du Luxembourg. Songer également à prendre contact avec les musées qui font une place importante à la métallurgie (Saint Jean de Maurienne pour l'aluminium, Nancy pour le fer).
- Convaincre encore plus de scientifiques et ingénieurs d'assurer cette promotion de la métallurgie lors d'invitations dans des grands congrès scientifiques, comme celui de la SF2M et de la Société Française de Mécanique (SFM).

8.5 Le Parlement

La commission d'enquête parlementaire sur la sidérurgie et la métallurgie française a déjà mis l'accent sur l'importance de la formation en métallurgie : il faut donc :

- Prendre contact avec "l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques" l'OPECST, de même qu'avec les membres des Académies des Sciences et de la Technologie, chargés des relations avec le Parlement.
- Obtenir une (ou des) interview(s) sur la chaîne TV parlementaire avec, à l'esprit, la double vision de la nature stratégique du problème pour le pays et de la ré-industrialisation et de l'emploi.

9. CONCLUSIONS

La réflexion menée dans ce rapport positionne la métallurgie **comme une composante essentielle de notre industrie, et comme une composante menacée**. Pour la maintenir et la développer au niveau nécessaire afin qu'elle demeure la force d'innovation et de revitalisation dont notre pays a le plus grand besoin, le rapport préconise des solutions ambitieuses et innovantes :

- Une structuration de la communauté métallurgique autour de trois pôles (Pôle Lorrain, Pôle Ile-de-France, Pôle Rhône-Alpes) et de centres d'excellence, l'ensemble constituant un réseau national assurant des fonctions de formation, de coordination des projets de recherche (notamment au niveau européen), et de visibilité de la métallurgie en tant que discipline.
- La mise en place d'un programme pluriannuel de recherche autour de 6 thématiques associant à la fois la recherche fondamentale et la recherche appliquée.
- La mise en réseau des Equipex, notamment ceux qui sont étroitement liés à des grands équipements de recherche.
- La signature d'accords-cadres avec les entreprises et la création d'un « fonds métallurgie » par le CNRS.
- La mise en place d'un observatoire du recrutement en lien avec le milieu industriel et les syndicats professionnels. Celui-ci devra notamment définir les besoins prévisionnels en recrutement à 10 ans de compétences métallurgiques pour les différents métiers de la production ou de l'utilisation des métaux et alliages métalliques.
- Une revitalisation des formations en métallurgie au niveau national, avec une mutualisation des sujets de recherche, et la mise en place de listes de candidats potentiels à des thèses.
- Des actions d'amélioration de la visibilité de la métallurgie au niveau de l'enseignement primaire et du Collège, par exemple au travers de la fondation « la main à la pâte ».

Toutes ces actions devront être coordonnées au niveau national et nous proposons donc de pérenniser le Comité d'Orientation National de la Métallurgie dans cette fonction.

ANNEXES

Annexe 1



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

Copie

Le Directeur du Cabinet

DGESIP

Paris, le **18 AVR. 2012**

Messieurs,

Je tiens à saluer l'excellent travail qui a été réalisé par le comité de réflexion mis en place pour proposer des recommandations concernant l'avenir de la métallurgie française.

Parmi les propositions émises dans le rapport que vous m'avez remis, figure la création d'un Comité d'orientation national regroupant des représentants : des industriels, des organismes de recherche, des pôles métallurgiques, des établissements de formation et du MESR.

J'ai le plaisir de vous informer que je donne mon aval à la création d'un tel Comité qui, sous l'égide de la Direction Générale pour l'Enseignement Supérieur et l'Insertion Professionnelle aura pour missions :

- La définition des programmes pluriannuels de recherche.
- La quantification sur 3 à 5 années glissantes, des besoins de recrutement des entreprises et des organismes de recherche.
- La définition des programmes de formation (initiale ou continue) correspondants.
- La rédaction d'un rapport annuel d'orientation destiné au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche ainsi qu'au Ministère de l'Industrie.

Je souhaite que ce comité présente son premier rapport d'orientation avant la fin de l'année calendaire.

Je vous prie d'agréer, Messieurs, l'expression de ma considération distinguée

Erkki MAILLARD

Monsieur Yves BRECHET
Monsieur Yves QUERE
Académie des Sciences

Monsieur André PINEAU
Académie des Technologies

Annexe 2

Composition du comité national d'orientation de la métallurgie

Madame Brigitte BACROIX	Directeur de recherche CNRS
Monsieur Serge BERCOVICI	ACADEMIE DES TECHNOLOGIES – GRAMEF
Monsieur Yves BRECHET	Haut-commissaire à l'énergie atomique
Monsieur Yannick CHAMPION	Directeur de recherche CNRS
Monsieur Pascal CLEMENT	Ingénieur Général des Mines – CGEJET
Madame Sabine DENIS	Professeur – UNIVERSITE DE LORRAINE
Monsieur Alexis DESCHAMPS	Professeur – IP GRENOBLE
Monsieur Bruno DUBOST	Directeur Scientifique – CONSTELLIUM
Monsieur David EMBURY	Professeur – UNIVERSITE MAC MASTER
Monsieur Jean-Jacques MAILLARD	Chargé de Mission – MESR / DGESIP
Monsieur François MUDRY	Président – IRT M2P
Monsieur Shigehisa NAKA	Chargé de mission - ONERA
Monsieur André PINEAU	ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
Monsieur Maurice PINKUS	Directeur Délégué – Relations enseignement UIMM
Monsieur Yves QUERE	ACADEMIE DES SCIENCES
Monsieur Claude QUILIEN	Directeur des matériaux et Procédés – SAFRAN
Monsieur Hubert SCHAFF	Directeur Partenariats & Innovation - AUBERT & DUVAL
Monsieur Jean-Hubert SCHMITT	Professeur à l'Ecole Centrale de Paris - Président SF2M
Monsieur Frédéric SCHUSTER	Directeur Programme matériaux – CEA
Monsieur Christian SIMON	Chargé de mission – MESR / DGRI
Monsieur Jean-François TASSIN	Directeur Scientifique – CNRS

Annexe 3

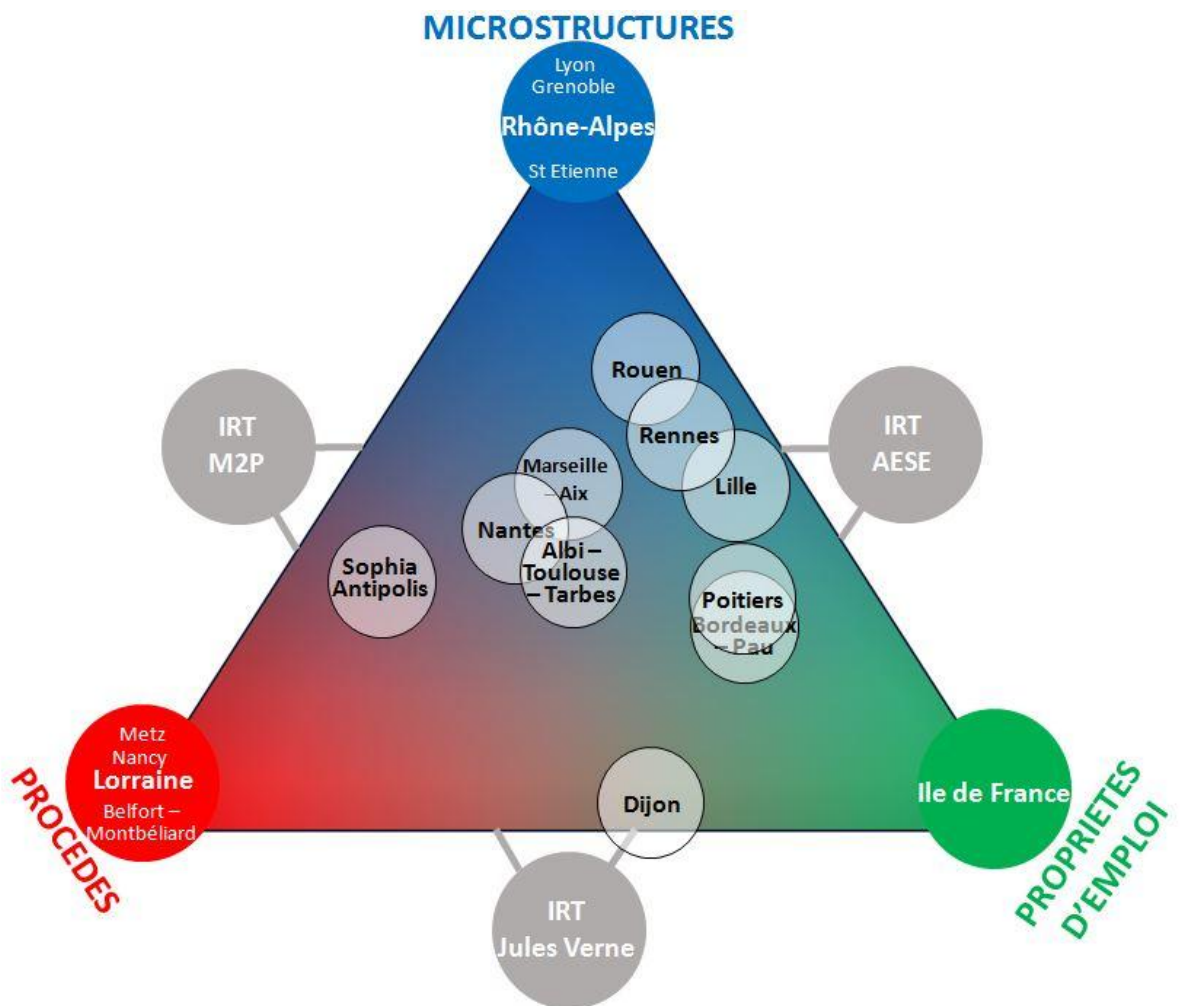
Composition des groupes de travail

THEMATIQUE GROUPE TRAVAIL	PARTICIPANTS
Définition des programmes pluriannuels de recherche	Pascal CLEMENT Shigehisa NAKA Claude QUILLIEN Hubert SCHAFF Frédéric SCHUSTER (*) Christian SIMON
Besoins en recrutement Opérateurs et cadres	Serge BERCOVICI (*) Maurice PINKUS R.H ARCELOR R.H SAFRAN
Programmes de formation	Yannick CHAMPION Alexis DESCHAMPS David EMBURY Shigehisa NAKA Jean-Hubert SCHMITT (*)
Implication des industriels	Bruno DUBOST François MUDRY Claude QUILLIEN Hubert SCHAFF Jean-François TASSIN (*)
Structuration des 3 Pôles	Brigitte BACROIX Yves BRECHET Yannick CHAMPION Pascal CLEMENT Sabine DENIS Alexis DESCHAMPS Jean-Jacques MAILLARD François MUDRY (*)
Visibilité de la Métallurgie	Jean-Jacques MAILLARD André PINEAU (*) Yves QUERE Frédéric SCHUSTER

(*) Animateur du G.T

Annexe 4

Articulation des pôles et des centres d'excellence



Annexe 5

Quelques exemples de programmes de recherche fédérateurs

1. Métallurgie extractive – Recyclage

La maîtrise du cycle des métaux stratégiques est une nécessité pour permettre le développement de nombreuses filières industrielles (énergies décarbonées, aéronautique, automobile...). La mise en place du COMES (COMité pour les MEtaux Stratégiques) a permis de donner une lisibilité aux actions concernant les métaux stratégiques. L'évaluation du besoin des entreprises nationales en métaux stratégiques ainsi que les actions de R&D à soutenir pour recycler, minimiser et substituer ces métaux sont au cœur de l'activité de deux des groupes de travail. La forte dépendance des technologies pour les énergies décarbonées vis-à-vis des métaux critiques a déjà suscité un certain nombre d'actions de recherche sur les trois volets. Il convient de développer au sens large, une démarche globale « d'efficacité matière » qui va au-delà de l'existant, en prenant particulièrement en compte les nouveaux procédés de production qui permettent de minimiser l'usage de métaux stratégiques. Notre capacité technologique nationale dans le domaine du recyclage doit être augmentée. En ce sens le domaine de l'hydrométallurgie constitue une technologie stratégique. Toutefois, il manque d'installations pilotes au niveau de la recherche technologique alors que les compétences existent ayant été développées entre autre pour répondre au besoin de la maîtrise du cycle du combustible nucléaire. La structuration d'un institut européen d'hydrométallurgie à partir des savoir-faire en chimie séparative, notamment celles du CEA et des industriels concernés, s'appuyant sur un solide réseau académique, constitue une réponse intéressante à la double problématique de la métallurgie extractive et du recyclage.

La mise en place d'une usine de recyclage de TA6V par UKAD/Aubert & Duval (projet EcoTitane) permettra de traiter la problématique du recyclage des alliages de titane (plus tard étendue éventuellement au TiAl), mais il manque en France une capacité technologique de R&D dans le domaine des métaux nobles (tantale, tungstène, molybdène, zirconium, vanadium), c'est-à-dire un outil de développement technologique à une échelle suffisante, ainsi que toute la chaîne en amont de cet outil (chaîne de préparation du matériau à recycler). Seul l'Institut Jean Lamour possède à Nancy une petite capacité de recherche sur le domaine mais d'une puissance insuffisante. Deux technologies sont envisageables pour ce type de procédés : l'EBCHR (fusion par faisceau d'électrons en creuset froid) et le PAMCHR (fusion par plasma d'arc Hélium en creuset froid).

Quelques actions proposées :

- *Mettre en place :*
 - *un Institut Européen d'Hydrométallurgie s'appuyant sur les savoir-faire en chimie séparative du CEA et des Industriels concernés,*
 - *un réseau académique français puis européen,*
 - *une KIC (Knowledge Innovation Community) sur les métaux stratégiques avec un centre de collocation en France, des installations pilotes de taille représentative pour le recyclage et l'exploitation minière.*
- *Mettre en place en France une capacité pour développer la recherche technologique sur l'EBCHR et le PAMCHR appliqués aux métaux nobles. Ce type d'opération pourrait se faire éventuellement dans le cadre d'un partenariat franco-allemand.*
- *Intensifier les recherches de base sur la modélisation de la solidification ainsi que celles sur la modélisation de la fusion par torches à plasma.*

2. Métallurgie pour la formulation et l'élaboration d'alliages innovants

En ce qui concerne la filière des alliages de titane, il existe clairement une volonté de structurer une filière française intégrée (en particulier avec Aubert & Duval et la joint-venture UKAD) et un besoin d'optimiser les nuances et d'en développer des nouvelles. Le fait que Timet soit repris par l'Américain PCC constitue un risque pour cette filière stratégique du domaine aéronautique. Dans les superalliages pour applications à hautes températures, l'ONERA possède de solides compétences, et les nuances sont en pleine évolution à l'échelle mondiale pour les moteurs aéronautiques et les turbine à gaz de production d'électricité. En ce qui concerne les alliages d'aluminium, Constellium développe en interne le cœur de métier concernant les nouveaux alliages, dans son centre de recherche (CRV). La même démarche de conception d'alliages et de traitements thermomécaniques pour des propriétés améliorées, en s'appuyant fortement sur la modélisation, est présente chez les industriels de l'acier.

Pour l'industrie automobile, les besoins en allègement sont très importants, comme cela est souligné dans le paragraphe 4 de cette annexe. Le développement de nouveaux aciers reste d'actualité, en particulier avec la troisième génération d'aciers à très haute résistance. Ce développement s'accompagne de recherches complémentaires sur les alliages d'aluminium, les composites, et maintenant les alliages de magnésium. Pour l'application de ces alliages légers dans le cadre de l'allègement des structures, il y a également un besoin d'augmenter le module d'élasticité (condition de réussite pour augmenter le champ des applications automobiles).

Pour les applications aéronautiques, les aciers spéciaux sont indispensables. Leur développement contribue à satisfaire les besoins d'allègement (voir § 4). En effet, les composites à matrices métalliques restent encore un marché de niche.

Les alliages intermétalliques à haute résistance sont également à développer en France.

D'une manière générale, la conception et l'élaboration de nouveaux alliages à performances spécifiques est indispensable. Il convient de développer les techniques de synthèse à haut débit et combinatoire. Ces technologies de criblage permettront d'accélérer la découverte et la mise en œuvre de nouveaux alliages à hautes performances.

Les méthodes de « métallurgie assistée par ordinateur » sont en train de vivre une véritable révolution par le développement de méthodes de calcul ab initio, de couplages thermodynamique / cinétique, par l'utilisation de simulations intensives pour comprendre la genèse des morphologies et des microstructures, et les relations microstructures-propriétés. Ces méthodes, fortement couplées à des approches expérimentales opérant aux mêmes échelles que les simulations, deviennent des outils puissants pour raccourcir les délais de développement, et, associées aux approches empiriques classiques, elles offrent au secteur industriel un atout de compétitivité majeur.

Quelques actions proposées :

- *Structurer une action coordonnée entre expérimentateurs et spécialistes des simulations numériques, associant industriels et académiques, pour le développement d'une « métallurgie combinatoire assistée par simulation numérique ». On pourrait orienter les actions de ce groupe de travail sur des applications pour la tenue à chaud ou pour l'allègement des structures. Cette action pourrait être couplée aux programmes « Materials Genome » en pleine expansion aux Etats Unis (initiative présidentielle de B.Obama).*
- *Développer une recherche technologique sur l'élaboration de composites à matrice métalliques (CMM) et d'alliages ODS par mécano-synthèse en intégrant le volet concernant le développement des outils de fiabilisation et de contrôle de la production.*
- *Rechercher des méthodes différentes de la mécanosynthèse pour l'élaboration des CMM et des alliages ODS.*
- *Développer des méthodes de criblage pour l'accélération de la mise au point de nouveaux alliages, et généralement des méthodes physiques de conception de nouveaux alliages métalliques.*

3. Métallurgie des procédés de fabrication et de mise en œuvre

3.1 Ingénierie des surfaces

Très clairement, la France accuse un retard important en matière de recherche technologique dans ce domaine pourtant stratégique dans la mesure où de plus en plus de pièces métalliques fonctionnent sous sollicitations extrêmes souvent combinées dans de nombreux secteurs industriels (corrosion, oxydation, irradiation...). L'évolution au cours de ces dix dernières années des technologies d'ingénierie des surfaces a été considérable et même les laboratoires académiques nationaux commencent à ne plus posséder les dernières générations de procédés, ce qui devient très problématique. Il y a donc un effort conséquent à faire de remise à niveau. Il existe cependant un certain nombre d'opportunités pour favoriser ce développement thématique, en particulier grâce à la mise en place des IRT. Il semble cependant nécessaire de se focaliser sur quelques sujets principaux.

L'anticorrosion des structures automobiles est assurée essentiellement par le revêtement de zinc des tôles, mais trois facteurs poussent à trouver d'autres solutions : la galvanisation ou le dépôt de zinc par voie électrochimique sont impossibles sur certaines nuances utilisées en grande série (ex : les aciers emboutis à chaud), les consommations mondiales de zinc sont telles que le « time horizon » du zinc semble limité, et la réglementation REACH tend à interdire (ou à formuler des demandes d'autorisation lourdes et coûteuses) des composants essentiels aux procédés classiques de traitement de surface.

Un réseau de compétences se met également en place pour développer des revêtements à bas coefficients de frottements (DLC par exemple). Cet axe de travail est très stratégique pour le domaine automobile pour faire baisser les niveaux de pertes par frottements et donc les émissions de CO₂.

Quelques actions proposées :

- *Structurer le « réseau Grand-Est des Traitements de Surfaces » associé à la création d'un master dans le domaine.*
- *Mettre en place un programme de type CPR dédié au remplacement du cadmium.*
- *Mettre en place un programme de type CPR visant le remplacement du chrome dur.*
- *Mettre en place un programme de recherche technologique sur l'I-PVD et l'hybridation des technologies.*
- *Evaluer la tenue sous irradiation des couches minces.*

3.2 Assemblage et procédés métallurgiques avancés

Les propriétés des matériaux sont fortement liées aux procédés utilisés pour leur élaboration, leur mise en forme et leur assemblage. Des progrès sont à attendre de nouvelles techniques avancées de fabrication pour applications nucléaires, spatiales et aéronautiques : Spark Plasma Sintering (SPS), frittage micro-ondes, prototypage rapide (fabrication direct net-shape), compression isostatique à chaud (CIC), usinage rapide, laser shock peening, friction stir welding, élaboration de matériaux à gradients de propriétés pour les tubes bimatériaux, matériaux multicouches... (métallurgie des poudres, nanostructuration, fonctionnalisation de surfaces). La maîtrise de ces procédés requiert une utilisation optimisée de la simulation numérique des procédés et le développement de méthodes de contrôle des procédés en temps réel.

Le besoin de réduction drastique dans le secteur du transport conduit à utiliser de plus en plus de matériaux de natures différentes. L'assemblage de ces matériaux entre eux constitue un véritable enjeu pour l'automobile, par exemple (acier/acier ; acier/aluminium ; acier/composite ; aluminium/composite ; ...). Les filières de dimensionnement devront devenir de plus en plus pertinentes et les procédés maîtrisés.

Quelques actions proposées

- *Développer des moyens de simulation des procédés métallurgiques avancés.*
- *Intensifier les recherches sur les assemblages multi-matériaux.*

3.3 Fabrication additive

Le développement de la fabrication additive, (aussi appelée *Impression 3D*, ou *Additive Layer Manufacturing* : ALM) s'accélère partout dans le monde avec des initiatives fortes, en particulier aux Etats Unis. Ces procédés dépassent d'ailleurs le seul cadre des matériaux métalliques (polymères, céramiques) avec des applications dans le domaine de l'aéronautique et du médical déjà clairement identifiées. Les progrès réalisés par ces technologies les ont fait passer de procédés de prototypage rapide à de réelles routes technologiques pour de la production de composants à forte valeur ajoutée. Cependant, comme il s'agit de technologies de transformation assez récentes, il existe un réel besoin de recherche amont, en particulier pour comprendre et caractériser la métallurgie issue de ces procédés, comprendre le rôles des défauts sur les propriétés, et enfin développer les outils appropriés de contrôle non destructif et d'assurance-qualité. La maîtrise de l'ALM nécessite également de développer les moyens de pilotage des différentes étapes clés avec la mise en place de systèmes de diagnostic et de boucles de rétroaction sur les paramètres des procédés. La maîtrise de la thermique du procédé doit faire l'objet d'une attention particulière tant au niveau du monitoring qu'au niveau de la modélisation. Des verrous technologiques restent encore à lever, en particulier ceux qui ont trait à la maîtrise des lois d'échelle. Enfin, la possibilité d'intégrer des capteurs dans les pièces en cours de fabrication est une voie particulièrement intéressante à explorer dans cette approche globale de fabrication de pièces innovantes afin de pouvoir proposer des produits à très forte valeur ajoutée. En amont des procédés d'ALM, un travail important sur la maîtrise des poudres est à réaliser afin de fiabiliser les sources d'approvisionnement de poudres « classiques » mais également de développer de nouvelles générations de poudres permettant d'envisager des composants nanostructurés, nanocomposites ou intégrant des fonctions directement apportées par la nature des poudres. En ce qui concerne les poudres dont la maîtrise constitue un aspect absolument stratégique de ce type de procédés, il est à noter qu'il existe en France une certaine capacité technologique d'élaboration. L'ONERA par le biais de l'EquipEx MATMECA s'est doté d'une tour d'atomisation permettant de produire de l'ordre d'une vingtaine de kilogrammes. L'UTBM-LERMPS possède également un moyen d'élaboration au même type d'échelle. ERAMET Alliages par le biais d'ERASTEEL pour les aciers et Aubert & Duval pour les superalliages possèdent des moyens de production et souhaitent être associés à ces recherches.

Quelques actions proposées

- *Développement d'une approche intégrée de l'ALM (Additive Layer Manufacturing) couplant la maîtrise des poudres de départ, l'étude des relations structures-propriétés, le pilotage des procédés, le contrôle non destructif, la simulation et l'intégration de capteurs dans les pièces.*
- *Mise en place d'un observatoire sur la technologie.*
- *Mise en place d'une commission au sein de la SF2M afin de créer une communauté nationale sur le domaine.*

4. Métallurgie pour l'allègement dans les transports

Pour l'automobile, les besoins en allègement sont très importants et ne passent pas seulement par l'utilisation croissante de l'aluminium ou des composites. La R&D sur de nouveaux aciers permettant d'atteindre de très hautes caractéristiques mécaniques (résistance mécanique supérieure à 1 500MPa) tout en ayant une bonne aptitude à la mise en forme reste un axe fort. Ces nouvelles générations d'acier permettent un allègement des structures à coût maîtrisé. Un axe complémentaire est la recherche d'une réduction de la densité des nouveaux aciers à propriétés mécaniques constantes. La métallurgie française a les capacités pour relever ce défi.

Dans l'industrie aéronautique, notamment, les structures et les équipements, le besoin d'allègement est fort, conduisant à des nouveaux développements d'alliages spéciaux. Par ailleurs, la suppression des revêtements polluants (Cd...) reste indispensable. Les composites à matrices métalliques constituent pour l'instant un marché de niche, et il n'existe pas vraiment aujourd'hui de produits matures de type composites à renforts particuliers produits en volumes importants. La filière de recherche amont a cependant été remontée en France en particulier avec une articulation Institut Jean Lamour / LMI. Ces types de matériaux présentent un intérêt pour EADS, par exemple (CMM Ti-TiB). Il manque cependant en France le volet recherche technologique sur la mécano-synthèse, ou sur d'autres procédés alternatifs, qu'il convient de développer. Des moyens technologiques sont clairement identifiés, en particulier au sein de la plate-forme Poudr'Innov du CEA-Grenoble. Les alliages intermétalliques à haute résistance sont également à développer.

Enfin, pour alléger les structures, l'idée d'introduire des fibres longues de grande résistance mécanique dans des composants avec des matrices métalliques (titane voire nickel ou cobalt) est une voie a priori attractive qui a déjà été explorée au stade laboratoire mais qui n'a pas levé tous les verrous pouvant permettre d'atteindre un niveau de maturité industrielle suffisant pour une commencer l'industrialisation.

Dans les propulseurs aéronautiques, la masse est un paramètre de 1^{er} ordre puisqu'il va directement impacter le rendement des machines au travers du rapport poussée/masse et au-delà, des conditions d'utilisation optimisées en termes d'émissions gazeuses et de consommation de carburant. La réduction de la masse des composants est donc une préoccupation constante des motoristes et le choix de matériaux légers est un des éléments qui permettra d'atteindre les objectifs visés. La température de fonctionnement sera le premier critère de choix : dans le domaine des plus basses températures, les composites à matrice polymère seront inévitablement une solution avantageuse en termes de densité et résistance par rapport aux alliages les plus légers à base d'aluminium ou de magnésium. A l'opposé, aux très hautes températures, l'emploi de matériaux métalliques n'autorise plus que des alliages à base de métaux réfractaires dont la haute densité sera rédhibitoire en comparaison de céramiques massives ou composites. Il demeure néanmoins une large plage de températures, située entre 200 et 1200°C, couvrant une grande partie du moteur et dans laquelle les alliages métalliques de hautes performances auront toute leur place. On songe en particulier aux alliages de titane qui associent densité limitée et haute résistance, et sur lesquelles des progrès peuvent encore être accomplis si on envisage des élaborations par voie poudres qui devraient permettre des compositions impossibles à réaliser par la voie conventionnelle du métal liquide. Plus généralement, les routes de fabrication mettant en œuvre des poudres métalliques sont certainement appelées à se développer avec en particulier les procédés de fabrication additive (voir §3.3).

Dans le domaine des plus hautes températures, les composés intermétalliques de par leurs liaisons atomiques spécifiques offrent des propriétés particulièrement attractives de bonne résistance associée à des densités limitées : les aluminures de titane type TiAl et leurs dérivés en sont un bel exemple pour remplacer des superalliages de nickel avec une densité deux fois plus faible. Aux très hautes températures, d'autres familles d'intermétalliques réfractaires de type siliciure de niobium par exemple constituent des pistes intéressantes pour remplacer les superalliages de nickel plus lourds.

L'allègement, à un coût raisonnable, est un processus complexe qui nécessite des échanges étroits entre les spécialistes des matériaux, les concepteurs des équipements concernés et les responsables de fabrication qui auront à adapter les procédés de mise en œuvre, voire à inventer des procédés spécifiques. L'application pratique est souvent bloquée par le manque de maturité d'un ou plusieurs maillons dans cette chaîne complexe (quelques fois, un seul). Il en découle l'action générale ci-dessous :

Quelques actions proposées :

- *Favoriser les échanges transverses et pluridisciplinaires destinés à identifier les options possibles pour l'allègement, les verrous scientifiques et technologiques correspondants, et à rédiger la feuille de route permettant d'aboutir à des applications concrètes et économiquement viables (cette thématique concerne aussi l'enseignement, où la science et la technologie seraient traitées aux mêmes niveaux)*
- *Mettre en place un programme de recherche et de formation associant les fournisseurs de matériaux et les bureaux d'études donneurs d'ordre pour accélérer le transfert des innovations dans le secteur métallurgique vers les concepteurs et la remontée vers le secteur métallurgique des besoins exprimés au niveau de la conception des pièces. Un programme de recherche qui conduirait à faire travailler en binôme, au niveau de la recherche, des doctorants des deux cultures serait extrêmement profitable à notre industrie en faisant émerger une nouvelle culture d'ingénierie.*
- *Mettre en place un programme de recherche, centré sur l'allègement des structures dans le transport, et qui traite dans un même mouvement le développement de nouveaux alliages, les méthodes de mise en œuvre et d'assemblages les mieux appropriées, et l'intégration de ces solutions dans la conception.*

5. Métallurgie pour les matériaux en conditions extrêmes

Les conditions d'utilisation actuelles des matériaux imposent des environnements de plus en plus sévères. C'est le cas de l'industrie aéronautique (notamment les matériaux de cellules, ainsi que les turbines qui travaillent à des températures de plus en plus élevées (voir §4)), de la cryogénie, des applications spatiales, de la production d'hydrogène, des applications à très hautes températures et, bien évidemment, des applications électro-nucléaires pour lesquels les conditions extrêmes sont imposées par l'irradiation.

Plusieurs exemples dans la suite de cette partie seront tirés du domaine de l'énergie nucléaire qui se caractérise par des conditions de fonctionnement extrêmes : hautes températures, contraintes mécaniques, irradiation, environnement corrosif, très longues durées et besoin de sécurité absolue. La gestion de ces conditions exige le recours à une connaissance du matériau à l'échelle la plus fine.

Les méthodes de simulations à l'échelle atomique (*ab initio*, dynamique moléculaire classique, Monte Carlo cinétique...) permettent une meilleure compréhension des phénomènes à leur niveau le plus fondamental. Les enjeux de performance des matériaux demeurent considérables, car les objectifs de rendement poussent à évoluer vers des conditions de fonctionnement à des niveaux de fluence et de températures très élevés, et les objectifs de fiabilité et de sûreté imposent de prévenir et de gérer en sûreté les agressions externes (séisme, impact d'avion...) et les accidents graves. Il est indispensable d'accroître la connaissance et de développer des outils de prédiction, pour fournir aux ingénieurs des méthodes et des outils robustes dans une approche globale (matériaux – mise en forme – assemblage – état de surface) optimisée. Les industriels et les chercheurs du nucléaire doivent disposer de méthodes fiables pour évaluer et justifier la durée de vie du parc nucléaire actuel, et déterminer des solutions optimisées pour l'amélioration (incrémentale ou en rupture) des filières actuelles et pour le développement des filières du futur. Bien évidemment ces approches et ces outils méthodologiques trouvent des applications dans de nombreux secteurs industriels.

5.1 Les aciers de cuve, d'internes et des circuits

Les principales problématiques sont les suivantes :

- Compréhension et simulation des interactions neutron / matière et influence sur la plasticité, la transition fragile/ductile (aciers ferritiques faiblement alliés des cuves), le gonflement et le fluage (acier inoxydables austénitiques des internes),
- Développement de nouveaux matériaux (aciers $2^{1/4}\text{Cr}$, aciers ferritiques /martensitiques, aciers martensitiques « basse activation »)
- Développement de critères d'amorçage physiquement fondés en fatigue et fatigue/ fluage
- Développement et validation des modélisations fondées sur la physique pour une plateforme de simulation du comportement des matériaux de cuve et internes.

5.2 Les alliages de zirconium

Les alliages de zirconium sont des matériaux clés en termes de disponibilité. Ils vont avoir une influence décisive sur la compétitivité des réacteurs actuels et le comportement en accident grave des réacteurs et des piscines de stockage. Les priorités sont : le comportement sous flux des matériaux de gainage et de structure d'assemblage, particulièrement en fluage et croissance, et le comportement en situations accidentelles : oxydation du Zirconium par la vapeur d'eau, réaction du Zirconium avec l'air.

5.3 Les aciers renforcés par nano-structuration

La recherche de tenue en température sur des durées longues implique le développement de nouvelles nuances résistantes au fluage. Cette résistance accrue au fluage à chaud peut être obtenue grâce à la dispersion d'une forte densité d'amas nanométriques dans certains aciers. De plus, pour les applications aux gaines des RNR-Na ou, de façon plus prospective, pour la filière REL, les aciers ODS martensitiques combinent, de plus, une bonne résistance aux effets d'irradiation induits par les déplacements atomiques, notamment le gonflement, du fait de leur structure cristalline cubique centrée. Ces aciers serviront de gainage soumis au fort flux de neutrons rapides des futurs réacteurs rapides de Génération IV et du prototype ASTRID.

5.4 Les mécanismes de corrosion

Elément essentiel de la durée de vie des métaux, particulièrement pour des fonctionnements en environnement sévère, la corrosion nécessite d'être maîtrisée et sa cinétique ralentie. Ainsi, la compréhension puis la modélisation des mécanismes de corrosion exigent de descendre à l'échelle atomique ou moléculaire. Cette approche permet de comprendre la formation des produits de corrosion et l'évolution des couches passives. De même, il est nécessaire d'aborder la modélisation de la corrosion sous contrainte localisée, la rupture de la couche passive, la modélisation mésoscopique, la fragilisation par l'hydrogène, le développement et la validation d'une modélisation multi-échelles, multi-matériaux et multi-milieus du comportement des matériaux, en particulier en environnement nucléaire.

5.5 La mécanique des structures

D'une façon générale, il est essentiel de développer des méthodes innovantes en mécanique des structures afin d'être plus prédictif dans un certain nombre de domaines :

- Compréhension / modélisation de l'usure vibratoire engendrée par les phénomènes de fretting et d'usure / corrosion
- modélisation/essai à des échelles locales fines en dynamique rapide pour application, par exemple, à la résistance aux séismes, et développement d'essais de type hybride
- modélisation des bétons armés, étude du vieillissement, de l'initiation et de la propagation de fissures, modélisation de l'endommagement et de la rupture des structures métalliques et de génie civil.

5.6 Compréhension / modélisation / simulation multi-échelles

Des actions de compréhension physique, caractérisation, modélisation, simulation, sur des objectifs transverses, sont enfin nécessaires afin de pouvoir faire des prévisions fiables de comportement sur des très longues durées (aéronautique, nucléaire...). Il est indispensable d'utiliser les connaissances physiques dans des outils de modélisation/simulation multi-échelles et multi-physiques, accessibles à une large communauté de chercheurs et ingénieurs, et associés à des moyens de caractérisation aux mêmes échelles.

Quelques actions proposées :

- *Développement et validation des modélisations fondées sur la physique et d'une modélisation multi-échelles, multi-matériaux et multi-milieus afin de prévoir le comportement des matériaux, principalement dans le cadre de mise en œuvre complexe et de tenue en service longue durée en environnement sévère.*
- *Approches expérimentales et numériques innovantes en dynamique des structures (séisme, dynamique rapide, chocs, impacts), en particulier via des essais du type hybride et raccordement des échelles entre simulation des matériaux et simulation des structures*
- *Développement d'une plateforme de simulation du comportement des matériaux de cuve et internes dans l'environnement nucléaire.*

6. Métallurgie des matériaux fonctionnels

La conception des matériaux à application fonctionnelle est très souvent réalisée par des chimistes des solides qui font une ingénierie de la maille cristalline. Le métallurgiste intègre, en plus de la chimie, la microstructure dans la prévision des propriétés. Associer une ingénierie des mailles cristallines et une ingénierie des microstructures pour avoir une démarche innovante dans une nouvelle classe de matériaux pour la métallurgie définit ainsi la métallurgie des matériaux fonctionnels.

Les exemples sont nombreux : alliages à mémoire de forme pour les actuateurs, les capteurs, les moteurs thermiques et les composants biomédicaux qui présentent également un grand intérêt. Dans le domaine de l'efficacité énergétique, les alliages magnéto-caloriques bas coût sont très intéressants pour les nouveaux systèmes de refroidissement. Une recherche est nécessaire dans le domaine des alliages pour catalyseurs métalliques destinés aux systèmes électrochimiques (électrolyse, PAC) dans l'optique d'une minimisation de l'utilisation des platinoïdes voire de leur substitution. Enfin, le développement d'alliages nano-composites magnétiques minimisant les teneurs en dysprosium est également nécessaire pour de nouvelles filières industrielles concernant les aimants permanents.

Cet ensemble de sujets nécessite une approche conjointe de modélisation (simulations numériques *ab initio*) et de caractérisation fine. Des moyens d'élaboration de très haute pureté et performance sont indispensables et existent au sein de la communauté.

Quelques actions proposées :

- *Mettre en place un groupe de travail sur les relations entre la métallurgie, les microstructures et les propriétés magnétiques des aimants durs. Ce groupe devra associer métallurgistes de l'élaboration, métallurgistes des microstructures, et physiciens des solides spécialisés dans le magnétisme. Il devra faire émerger une force de recherche capable d'attaquer sur des bases scientifiques le problème difficile du remplacement des terres rares.*
- *Mettre en place un groupe de travail sur les relations entre propriétés thermoélectriques et magnéto-caloriques et microstructures des alliages. Les communautés à fédérer ici sont les métallurgistes, les chimistes des solides, et les physiciens des solides. Ce groupe devra faire émerger une communauté scientifique en état de concevoir et développer des alliages à bas coût permettant la récupération industrielle de l'énergie dégradée entre 100°C et 400°C dans les grands procédés industriels.*
- *Les problèmes de vieillissement des batteries et des piles à combustible sont très souvent des questions impliquant des concepts de métallurgie physique ou mécanique. Les communautés scientifiques se rencontrent peu et la fertilisation croisée dans ces domaines est à la fois rare et pourtant hautement souhaitable. Une réflexion sur ce sujet permettant de fédérer ces communautés autour du vieillissement des dispositifs de stockage de l'énergie est nécessaire pour définir et mener à bien les actions de recherches appropriées.*