

2011

ACADÉMIE DES SCIENCES
ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

LA MÉTALLURGIE

SCIENCE ET INGÉNIERIE

Sous la direction de
ANDRÉ PINEAU et
YVES QUÉRÉ



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



ACADÉMIE
DES TECHNOLOGIES

POUR UN PROGRES RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

La Métallurgie

science et ingénierie

RAPPORT SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE N° 31
Animateurs : André Pineau et Yves Quéré

ACADÉMIE DES SCIENCES – ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Rapports sur la science et la technologie

- *Sciences et pays en développement. Afrique subsaharienne francophone*
RST n° 21, 2006.
- *La recherche spatiale française*
RST n° 22, 2006.
- *L'épidémiologie humaine. Conditions de son développement en France, et rôle des mathématiques*
RST n° 23, 2006.
- *La maîtrise des maladies infectieuses. Un défi de santé publique, une ambition médico-scientifique*
RST n° 24, 2006.
- *Les eaux continentales*
RST n° 25, 2006.
- *La fusion nucléaire : de la recherche fondamentale à la production d'énergie ?*
RST n° 26, 2006.
- *Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux*
RST n° 27, 2007.
- *Hormones, santé publique et environnement*
RST n° 28, 2008.
- *Événements climatiques extrêmes. Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux*
RST n° 29, 2010.
- *Les sciences spatiales. Adapter la recherche française aux enjeux de l'Espace*
RST n° 30, 2010.

Imprimé en France

© 2011, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN 978-2-7598-0538-9

Rapport sur la Science et la Technologie

Le Comité interministériel du 15 juillet 1998, à l'initiative du ministre de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, a confié à l'Académie des sciences l'établissement du rapport biennal sur l'état de la science et de la technologie.

Depuis 1999, trente rapports ont ainsi été édités et remis au ministre délégué à la Recherche.

Dans le cadre des liens étroits de collaboration entre l'Académie des sciences et l'Académie des technologies, il a été décidé de traiter le thème de la métallurgie. Un groupe de travail commun a été constitué. Il a rédigé le présent rapport qui a été soumis aux procédures de validation propres à chacune des deux académies.

À l'Académie des sciences, le rapport a été soumis au Comité « *Rapport Science et Technologie* » (RST) le 19 janvier 2010, puis présenté à un Groupe de lecture critique le 9 avril 2010 et voté en séance plénière le 6 juillet 2010.

À l'Académie des technologies, le rapport a été présenté au Comité des travaux le 7 juin 2010, puis soumis au Comité de la qualité le 14 juin 2010 et voté par l'assemblée de l'Académie le 7 juillet 2010.

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m { ' i g h v' d n e p m

COMPOSITION DU COMITÉ RST DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Christian AMATORE

Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au Centre national de la recherche et à l'École normale supérieure

François BACCELLI

Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique

Jean-François BACH

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences – Professeur à l'université René-Descartes

Roger BALIAN

Membre de l'Académie des sciences – Physicien à l'Institut de physique théorique – CEA Saclay

Alain CARPENTIER

Vice-président de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Patrick CHARNAY

Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale

François CUZIN

Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université de Nice-Sophia-Antipolis

Michel DAVIER

Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Paris-Sud Orsay

Henri DÉCAMPS

Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche émérite au Centre national de la recherche scientifique

Jean DER COURT

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Christian DUMAS

Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'École normale supérieure de Lyon

Pierre ENCRENAZ

Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Marc JEANNEROD

Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Claude-Bernard

Jean-Pierre KAHANE

Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Paris-Sud Orsay

Bernard MEUNIER

Membre de l'Académie des sciences – Président-directeur général de Palumed

Paul-Henri REBUT

Correspondant de l'Académie des sciences – Ancien directeur du Jet et d'Iter – Conseiller d'Iter

Jean SALENÇON

Président de l'Académie des sciences – Membre de l'Académie des technologies – Ingénieur général honoraire des ponts et chaussées – Professeur honoraire à l'École polytechnique et à l'École nationale des ponts et chaussées

Erich SPITZ

Correspondant de l'Académie des sciences – Membre de l'Académie des technologies – Conseiller du groupe Thales

Pierre SUQUET

Membre de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique

Philippe TAQUET

Membre de l'Académie des sciences – Professeur au Muséum national d'histoire naturelle

Alain-Jacques VALLERON

Membre de l'Académie des sciences – Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Jean-Christophe Yoccoz

Membre de l'Académie des sciences – Professeur au Collège de France

Coordination éditoriale :

Joëlle Fanon

Adjointe du directeur du service des publications de l'Académie des sciences

Vj ku' r ci g' k' p v g p v k' p c m' ' i g h' d r e p m

COMPOSITION DU COMITÉ DES TRAVAUX DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

Président :

Yves FARGE

Membre de l'Académie des technologies – Président du Comité des travaux de l'Académie des technologies – Ancien Directeur de la R & D du Groupe Pechiney – Consultant

Membres :

Michel BOUTHIER

Membre de l'Académie des technologies – Ingénieur en chef de l'Armement – Secrétaire général du Conseil scientifique de la Défense

Philippe COIFFET

Membre de l'Académie des technologies – Ancien Directeur de recherche au CNRS

Louis DUBERTRET

Membre de l'Académie des technologies – Président de la Fondation René Touraine pour le progrès thérapeutique en Dermatologie – Directeur de l'Institut de recherche sur la peau

Dominique FERRIOT

Membre de l'Académie des technologies – Professeure des Universités au Cnam

Erol GELENBE

Membre de l'Académie des technologies – Professor in the Dennis Gabor Chair – Imperial College

François LEFAUDEUX

Membre de l'Académie des technologies – Ingénieur général de l'Armement

Jean-Claude MILLET

Membre de l'Académie des technologies – Fondateur de la société IMAJE – Président du Conseil de surveillance de OSMOOZE SA et MILLET Innovation SA

Alain MONGON

Membre de l'Académie des technologies – Gérant de la société Amisa

Pierre MONSAN

Membre de l'Académie des technologies – Professeur à l'Institut national des sciences appliquées de Toulouse et à l'École nationale supérieure des mines de Paris – Membre de l'Institut universitaire de France – Président du CCRRDT Midi-Pyrénées

Alan PAVÉ

Membre de l'Académie des technologies – Professeur des Universités – Directeur de recherche au CNRS – Directeur CNRS - Guyane

Gérard SABAH

Membre de l'Académie des technologies – Directeur de recherche au CNRS

Jean-Paul TEYSSANDIER

Membre de l'Académie des technologies – Ancien Directeur de VINCI Concessions

COMPOSITION DU COMITÉ DE LA QUALITÉ DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

Président :

Jacques LÉVY

Membre de l'Académie des technologies – Ingénieur général des mines –
Président de la Fondation des industries minérales, minières et métallurgiques

Membres :

Paul CARO

Membre de l'Académie des technologies – Correspondant de l'Académie des
sciences – Directeur de recherche honoraire au CNRS

Jean DHERS

Membre de l'Académie des technologies – Ancien Président du Centre de re-
cherches en électrotechnique et en électronique de Belfort (CREEBEL)

François LEFAUDEUX

Membre de l'Académie des technologies – Ingénieur général de l'Armement

Claire MARTIN

Membre de l'Académie des technologies – Directeur de l'information Corporate
– Renault

Roland MASSE

Membre de l'Académie des technologies – Président honoraire de l'Office de
protection contre les risques ionisants

Vj k' r' ci g' l' p' v' g' p' v' k' p' c' m' (' i' g' h' v' ' d' i' e' p' m

AVANT-PROPOS

Pierre-Étienne Bost

Délégué général de l'Académie des technologies

Jean Dercourt

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences

Le 4 mars 2010, le Président de la République a conclu les États généraux de l'Industrie en ces termes :

« La France a commencé à se désindustrialiser massivement à partir de l'an 2000. C'est très simple depuis cette date, nous avons perdu 1/2 million d'emplois dans l'industrie (. . .). 1/2 millions d'emplois dans l'industrie perdus. Aujourd'hui, l'industrie occupe 13 % de la population active française, c'était encore 16 % il y a 10 ans. Nous sommes, pire, le grand pays européen le plus désindustrialisé (. . .). L'industrie produit 16 % de la valeur ajoutée française contre 23 % en Italie et 30 % en Allemagne. Voulez-vous m'expliquer quelle est la fatalité qui fait que la part de valeur ajoutée produite par l'industrie en Allemagne soit deux fois plus grande qu'en France ? Et que nos amis italiens fassent tellement mieux que nous ? »

L'Académie des technologies et l'Académie des sciences présentent ici une analyse de la métallurgie française et, parce que la Métallurgie touche tous les secteurs de l'industrie, elle en est représentative. Cette analyse se limite strictement à la situation française et les Académies pourraient également envisager d'examiner la situation européenne et même internationale, différente par de nombreux aspects, de celle de la France, comme le soulignait le Président de la République.

Le présent rapport est un élément d'information. Il a été établi par un groupe d'experts animé par André Pineau de l'Académie des technologies et Yves Quéré de l'Académie des sciences. À l'Académie des sciences le résultat a été présenté à un Groupe de lecture critique, constitué de représentants d'organismes extérieurs aux académies. À l'Académie des technologies, le travail a été présenté au Comité des travaux puis au Comité de la qualité. L'Académie des technologies et l'Académie des sciences ont ensuite approuvé ce travail.

Traiter de la Métallurgie revient à considérer chacun de ses secteurs. Le rapport s'ouvre sur une présentation générale de l'état de la Métallurgie en France et en dégage les principales caractéristiques en ces termes :

« Une production et des effectifs qui régressent, des centres de gravité qui s'éloignent de la France, une recherche technique qui résiste en partie, un effort universitaire qui s'émiette et un enseignement qui s'affaisse, un assèchement à redouter, une condamnation à l'excellence ».

Le rapport distingue 23 domaines industriels, présentés d'abord de façon synthétique, puis développés avec une grande précision dans des annexes numérisées. Dans chaque domaine est décrit l'état actuel et sont proposées des pistes de développement scientifique et appliqué.

Le Groupe de lecture critique a souligné la qualité de cet état des lieux. Plusieurs de ses membres ont insisté sur l'importance à accorder aux nécessaires combinaisons métaux/matières plastiques/céramique. . . , permettant, par exemple, d'alléger les pièces usinées.

La formation des ingénieurs et des techniciens constitue une des questions les plus graves de l'industrie et, en particulier, dans les secteurs liés à la Métallurgie. Ainsi, les principales grandes écoles ont supprimé de leur programme la Métallurgie en tant que science et technique industrielle, car l'attractivité des disciplines industrielles est faible : ceci est lié essentiellement à l'extrême diminution des emplois, régulièrement depuis l'année 2000 et qui s'accélère depuis 2008. Ceci est également dû aux moindres rémunérations qui se pratiquent dans ce secteur : les industries auxquelles concourt la métallurgie ne figurent plus qu'en cinquième position dans le classement des salaires moyens (derrière le secteur de la finance, les télécommunications, les transports, le commerce).

Le rapport évalue à 300 le nombre d'étudiants ingénieurs formés annuellement en science des matériaux, dont une centaine en métallurgie, et à 20 000 le nombre des techniciens issus des différents DUT, BTS, licences professionnelles, concernés par ce champ disciplinaire, mais bien peu d'entre eux se consacrent à la métallurgie.

Il est paradoxal, en revanche, que les postes vacants soient difficiles à pourvoir, aux dires des industriels consultés. L'information auprès des étudiants pourrait être améliorée par l'action concertée des unions, des sociétés savantes et des associations professionnelles.

La qualité des recherches dans le domaine de la Métallurgie est passée en revue dans les 23 secteurs reconnus dans ce rapport. À titre d'exemple, la place de la France dans les traitements très originaux de l'acier est soulignée, mais

ceux-ci n'ont pas été accompagnés par la poursuite de la production de masse. Dans de très nombreux secteurs, il est montré que la recherche a permis des avancées technologiques mises en œuvre par l'industrie. Si l'Agence nationale de la recherche n'a pas affiché la métallurgie en tant que telle dans les projets à soutenir, de très nombreuses propositions spontanées (programmes blancs) ont été soumises et retenues. Ainsi, en 2009, concernaient la métallurgie : 9 projets non thématiques sur 31 (29 %) en « Sciences pour l'ingénieur » et 1 sur 35 dans le domaine interdisciplinaire ; 9 projets sur 22 (40 %) pour l'appel d'offres partenarial « Matériaux fonctionnels et procédés innovants ». Ceci témoigne de la volonté des acteurs de la recherche de participer aux grands programmes internationaux, comme ceux liés au projet Iter. Plus largement, ceci montre que la recherche académique française en métallurgie témoigne d'un dynamisme certain, tant en qualité innovante qu'en quantité, avec ou sans partenariat industriel. Elle est en capacité qualitative, et encore quantitative, pour relever avec succès les défis scientifiques et sociétaux de sa discipline, comme elle a su le faire dans le passé. Mais il faut pour cela qu'elle soit soutenue par une stratégie nationale volontariste.

Le Président de la République, à la demande des États généraux de l'Industrie, a souhaité le 4 mars 2010 « la création d'une Conférence nationale de l'industrie se réunissant régulièrement. Elle rassemblera les entreprises, les salariés, les filières et le gouvernement pour traiter spécifiquement des problèmes de l'industrie ». Au terme de ce rapport, l'Académie des sciences et l'Académie des technologies souhaitent être associées à cette réflexion. Elles ont formulé leurs recommandations.

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v ' d n e p m

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Animateurs

André PINEAU	Membre de l'Académie des technologies – Professeur à l'École nationale supérieure des mines de Paris
Yves QUÉRÉ	Membre de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'École polytechnique

Membres

Denis ABLITZER	Professeur à l'École nationale supérieure des mines de Nancy
Bernard BLANZAT	Directeur de recherche honoraire au CNRS – Chargé de mission à l'Académie des sciences
Yves BRÉCHET	Professeur à l'Institut national polytechnique de Grenoble – Membre senior de l'Institut universitaire de France
Bruno DUBOST	Membre de l'Académie des technologies – Directeur scientifique d'Alcan Engineered Products – Centre de recherches de Voreppe
Gilbert FANTOZZI	Professeur des universités – Institut national des sciences appliquées de Lyon – Laboratoire de recherche matériaux, ingénierie et science
Élisabeth GAUTIER	Directeur de recherche – École des mines de Nancy – Laboratoire de science et génie des matériaux et de la métallurgie (UMR 7584 CNRS/INPL/UHP)
Denis GRATIAS	Correspondant de l'Académie des sciences – Directeur de recherche au CNRS – Laboratoire d'études des microstructures CNRS/Onera

André GRELLIER	Directeur scientifique – Aubert & Duval – Groupe Eramet
Georges MARTIN	Conseiller scientifique auprès du Haut Com- missaire à l'énergie atomique
Andreas MORTENSEN	Professeur – Directeur de l'Institut des ma- tériaux de l'École polytechnique fédérale de Lausanne
François MUDRY	Membre de l'Académie des technologies – Directeur scientifique d'ArcelorMittal
Jean PHILIBERT	Professeur émérite à l'université Paris-sud – Laboratoire Physicochimie de l'état solide
Pierre SAINFORT	Directeur général – Pi-R Strategy & Mana- gement
Jean SALENÇON	Président de l'Académie des sciences – Membre de l'Académie des technologies – Ingénieur général honoraire des ponts et chaussées – Professeur honoraire à l'École polytechnique et à l'École nationale des ponts et chaussées
Daniel URFFER	Directeur scientifique – Saint-Gobain – Centre de recherches et d'études européen (CREE)
André ZAOUÏ	Correspondant de l'Académie des sciences – Membre de l'Académie des technologies – Directeur de recherche au CNRS

Coordinateur

Jean DERCOURT	Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences – Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie
---------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ont également participé à la rédaction du rapport

Alain BARBU, Brigitte BACROIX, Pierre BARBERIS, Marc BOUSSEAU, Jean-Louis BOUTARD, Thierry BRAINE-BONNAIRE, Hélène BURLET, Jean-Yves CAVAILLÉ, Yvan CHASTEL, Jean-Louis CHENOT, Jean-Pierre CHEVALIER, Emmanuel CLOUET, Marc CONDAT, Alain COURET, Denis DELAGNES, Alexis DESCHAMPS, Chu-Chun FU, Olivier GEOFFROY, Dominique GIVORD, Thierry IUNG, Tasadduq KHAN, Yves LIMOGES, Dominique MANGELINCK, Philippe MASCLET, Jean-Paul MASSOUD, Frank MONTHEILLET, Bruno MORTAIGNE, Philippe PAREIGE, Jean-Paul POIRIER, François ROPITAL, Georges SAADA, Luc SALVO, Gilles SURDON, Olivier THOMAS, Jean-François TIERS, Marc VERDIER, Jean-Marie WELTER, François WILLAIME.

Vj k' r ci g' l p v g p v k p c m { ' i g h v ' d i e p m

TABLE DES MATIÈRES

Rapport sur la Science et la Technologie	iii
Composition du Comité RST de L'académie des Sciences	v
Composition du Comité des travaux de l'Académie des technologies	ix
Composition du Comité de la qualité de l'Académie des technologies	xi
Avant-propos	xiii
Composition du groupe de travail	xvii
Résumé et recommandations	xxv
Summary and recommendations	xxix
Introduction	1
CHAPITRE 1 La Métallurgie, une science à part entière	11
1. La Métallurgie, mère de la science des matériaux	13
2. Métallurgie physique et physique du métal	15
2.1. Techniques...	16
2.2. ...et problématiques	17
3. Métallurgie et mécanique	18
4. Métallurgie, chimie et thermodynamique	20
4.1. Métallurgie et chimie : un long compagnonnage	21
4.2. De la thermodynamique et des diagrammes de phase...	24
4.3. ... aux évolutions structurales	25

5. Métallurgie, physique statistique et numérique	26
6. Métallurgie et élaboration	29
6.1. Les procédés du futur	30
6.2. Maîtrise de la qualité des produits	32
6.3. Maîtrise des procédés de coulée et de solidification	34
Conclusion	35

CHAPITRE 2 La Métallurgie : une industrie en pleine mutation 37

1. L'industrie métallurgique en France	41
1.1. Métallurgie et transformation des métaux	41
1.2. Applications des produits métalliques	41
1.3. Restructurations et concentrations	42
1.4. Positions industrielles et technologiques en France	42
1.5. Impacts dans d'autres domaines	42
2. Mise en forme et mise en œuvre	43
3. Métallurgie et transports	46
3.1. Transport aéronautique	46
3.2. Transport ferroviaire	50
3.3. Transport routier	51
3.4. Transport maritime	53
4. Métallurgie et énergie nucléaire	56
4.1. Des métaux, dont certains inhabituels...	56
4.2. ... soumis à irradiation...	57
4.3. ... et présents lors du stockage	59
5. Autres énergies	61
5.1. Énergie solaire	61
5.2. Piles à combustibles : besoins et défis métallurgiques	61
5.3. Énergie éolienne	63
6. Magnétisme et Métallurgie	63
7. Travaux publics et construction	65
7.1. Enjeux	65
7.2. Apports de la Métallurgie	66
7.3. Position de la France	67
8. Métaux et Défense	67
9. Biomatériaux métalliques	69

10. Emballage	70
10.1. Enjeux	70
10.2. Métallurgie, protection et recyclage	70
10.3. Résistance mécanique et mise en forme	71
10.4. Position de la France	72
11. Outillage	73
11.1. Contexte	73
11.2. Thématiques d'innovation	73
12. Microélectronique	75
13. Industrie pétrolière	77
13.1. Corrosion liée au pétrole	78
13.2. Transport des hydrocarbures (pétrole et gaz)	79
CHAPITRE 3 La Métallurgie : recherche et enseignement	81
1. La recherche en Métallurgie	83
1.1. L'organisation de la recherche publique...	83
1.2. ...et ses conséquences	83
1.3. Le CEA, l'Onera, l'Irsid...	84
1.4. ... et le monde industriel	84
1.5. Nécessité d'une adaptation d'impédance	86
2. Enseignement de la Métallurgie	88
Références bibliographiques	91
Glossaire	99
Groupe de lecture critique	105
Composition du Groupe de lecture critique	107
Commentaire de l'Association française de mécanique	109
Commentaire du CNRS	111
Commentaire du CEA	115
Commentaire de la Conférence des présidents d'université	119
Commentaire de la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services	121
Commentaire de EDF Ceidre	125
Commentaire de MECAMAT	127

Commentaire de PSA Peugeot Citroën	129
Commentaire de Renault	131
Commentaire de la Société française de métallurgie et des matériaux	133
Commentaires de la Société française de physique	139
Présentation à l'Académie des sciences, par Jacques Friedel	141

RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS

La Métallurgie, science des métaux et discipline technique liée à la production, la mise en forme et l'assemblage des métaux, constitue un atout majeur de l'économie européenne.

L'industrie métallurgique française – des *producteurs* (aciers, alliages légers...) aux *utilisateurs* (automobile, aviation, nucléaire...) – a atteint dans nombre de secteurs un niveau d'excellence mondiale, adossée qu'elle est à des centres de recherche de qualité, eux-mêmes en prise directe avec une floraison de travaux universitaires reconnus, théoriques et expérimentaux, encore que la recherche publique soit insuffisamment tournée vers l'ingénierie. En 2004, ladite industrie fournissait 1 800 000 emplois, dont 220 000 ingénieurs et cadres dans 45 000 entreprises, avec un chiffre d'affaire de 420 milliards d'euros.

Cette situation favorable est en train de se dégrader. Nous subissons – là comme ailleurs – une « désindustrialisation » qui a rejailli sur tout l'amont : l'enseignement de ces matières, naguère brillant, a partiellement disparu ; des laboratoires se sont contractés ; des compétences ont été dispersées ; les étudiants se sont éloignés de disciplines jugées « non porteuses », à l'instar d'autres sciences de l'ingénieur.

Dans le même temps, dans l'amont de la filière, les centres de décision se sont éloignés des centres de production ainsi que du pays. La France conserve encore quelques grands centres de R&D dans des groupes internationaux malgré la part décroissante de la production française dans le monde. Cependant, dans ces groupes, on voit plutôt l'avenir de la R&D dans les pays émergents (Chine, Inde...). Les grands utilisateurs (transport, énergie...) ont tendance à perdre leurs experts, tout comme les centres techniques sur lesquels s'appuie le vaste réseau de PMI/PME : les conséquences en sont redoutables avec des pertes de contrôle technique déjà observables.

Cette « logique » peut – et, à coup sûr, doit – être renversée. Par sa présence dans tant de secteurs et par son excellence, la Métallurgie – recherche et industrie confondues – est une activité essentielle pour laquelle la France doit demeurer un des protagonistes majeurs. Elle a tout, si la volonté existe, pour y restaurer son unité et son dynamisme. Mais cela suppose, impérativement, la redéfinition d'une politique industrielle.

Le présent rapport replace la Métallurgie dans sa double réalité de science et d'ingénierie, et ce sous deux angles : d'abord celui du *besoin* : le progrès y est clé de succès en des domaines tels que le transport et l'énergie, notamment nucléaire, pour ne citer que deux exemples phares. Ensuite, celui de

l'opportunité : disciplines complexes, riches de découvertes comme de retombées techniques, science et ingénierie métallurgiques s'enrichissent l'une l'autre. Perdre une position de pôle dans ces domaines est dangereux ; en prendre une de leader est un défi à relever. Nous sommes actuellement à ce tournant.

Le texte qui suit, dit « de synthèse » et suivi de nombreuses annexes, décrit en premier lieu la Métallurgie comme *science*, en tant que telle, en lien fort avec l'ingénierie, ou *génie métallurgique* (chapitre 1). Il établit alors un diagnostic de la situation pour divers *secteurs industriels* (chapitre 2) ainsi que pour la *recherche et l'enseignement* (chapitre 3). Devant la gravité des évolutions actuelles ainsi recensées, qui rejaillissent notamment sur les emplois, les compétences, la R&D..., les deux académies proposent aux décideurs, publics et privés, une stratégie déclinée en une série de recommandations (trait vertical de marge dans le texte). Il y est demandé :

1. Qu'une *politique industrielle* soit redéfinie et remise en œuvre, les problèmes de la métallurgie n'en constituant qu'un volet particulier.
2. Que, en amont, la Métallurgie, en la double acception du terme, soit intégrée – dans nombre des cursus d'écoles d'ingénieurs, universités, Cnam, IUT, formations BTS... – comme matière scientifique et technologique moderne, riche de sujets d'enseignement originaux, débouchant sur des applications industrielles majeures.
3. Que science et génie métallurgiques soient individualisés par les grands organismes de recherche comme activités idéalement interdisciplinaires, mêlant au mieux l'appliqué et le fondamental.
4. Que soit créée pour 3 ans – à l'initiative des ministères chargés de l'Industrie, de la Recherche et de l'Enseignement – une *Mission interministérielle* (cf. chapitre 3, recommandation 6) comprenant, à parts égales, industriels et universitaires, français et étrangers. Cette *Mission* devra proposer rapidement (dans l'année suivant sa création) au Gouvernement un ensemble de mesures concernant en particulier les points suivants. Il veillera, durant les deux années postérieures, à leur mise en application.
 - *Formation et Recherche* : mesures relatives aux points 2. et 3. ci-dessus, marquées en particulier par la création des « Pôles » résumée au point 5. ci-après.
 - *Entreprises de taille moyenne* : liens à créer avec le milieu de la recherche (Centre technique ? « Plate-forme » de génie métallurgique ?...), en particulier *via* les laboratoires locaux.
 - *Maintien en France* d'une partie substantielle de la recherche industrielle, en lien fort avec la recherche européenne.

5. Que soient installés par la *Mission*, au terme d'une procédure rigoureuse, quelques (de 2 à 4) « Pôles enseignement/recherche » ou « Instituts de Métallurgie » ? (cf. chapitre 3, recommandation 8) affermissant les collaborations laboratoires publics/centres de recherche industriels (français et européens), notamment par échanges croisés de chercheurs.

L'objectif ici recherché est que l'industrie métallurgique, créatrice de richesses et d'emplois, en prise directe avec l'ensemble de l'activité économique, conserve dans notre pays la place éminente qu'elle a réussi à atteindre ; et que son affaissement (recherche/innovation/production) récemment amorcé soit stoppé, appui étant pris sur les pôles mentionnés en 5.

La situation présente de la Métallurgie en France est mauvaise. Elle peut devenir rapidement catastrophique s'il n'y est pas porté remède dans de brefs délais.

Avertissement

Le présent rapport a été rédigé pour alerter les pouvoirs publics et l'opinion sur la situation inquiétante, en France, de la Métallurgie – à la fois science subtile et activité industrielle considérable. Le choix a été fait de décrire l'état actuel de ce grand champ d'activité en regard de son passé récent, ainsi que d'émettre des recommandations, mais non pas d'ouvrir à ce sujet une vision prospective d'ensemble, notamment au plan économique. Cette tâche sera celle de la *Mission interministérielle* évoquée ci-dessus si, conformément à ces recommandations, elle est créée par les trois ministres concernés.

Le lecteur croira peut-être déceler dans ce rapport un paradoxe voire une contradiction. D'un côté on y décrit en effet un large domaine d'enseignements, de recherches et d'innovations... qui souffre d'une grave désaffection (chapitres 1 et 3). De l'autre, une industrie aux effectifs et aux productions encore importantes (chapitre 2), en santé relativement bonne, parfois excellente, qui ne semble connaître que partiellement ladite désaffection. Où est l'erreur ?

Il n'y en a pas. Cette industrie, valeureuse et puissante, possède une grande inertie – au très bon sens de ce mot. Elle fonctionne donc, en grande partie, sur une « lancée » de qualité, mais à l'avenir incertain. Déjà connaît-elle des difficultés de recrutement, qui ne peuvent aller qu'en croissant. En effet l'amont, qui s'assèche, ne fournit plus les chercheurs, ingénieurs, techniciens... susceptibles de maintenir l'excellence en question. S'y ajoutent, par le fait même de la mondialisation, des tendances à « externaliser » toute une partie de la recherche, et certaines des productions.

C'est toute la Métallurgie de notre pays – et dans certains cas de l'Europe – qui est donc en danger.

Le texte du rapport émane d'un groupe de travail mis en place par les deux académies. Il a bénéficié des interventions de bon nombre de métallurgistes français et étrangers que nous remercions vivement, en saluant particulièrement l'intense participation de notre collègue Yves Bréchet.

Le travail de mise en forme dû à Joëlle Fanon, que nous remercions, a été en tous points exemplaire.

Yves Quéré
André Pineau

SUMMARY AND RECOMMENDATIONS

Metallurgy, the science of metals and the technical discipline concerned with the production, shaping and assembling of metals, is one of the major assets of European economy.

The French metallurgy industry – from *producers* (steel, light alloys,...) to *users* (car, aviation, nuclear industries,...) – has achieved in many of its sectors a world-class level of excellence, based on high-quality research centres that are recognized both for their theoretical and experimental academic work. By contrast, public research is insufficiently concerned with engineering. In 2004, this industry employed 1 800 000 persons, 220 000 of which worked as engineers and managers in 45 000 companies, with a turnover of 420 billion euros.

This state of grace is starting to decline. We are undergoing, in this sector as in others, a deindustrialisation that affects upstream activities: courses in these disciplines, which have been previously outstanding, have partially disappeared; laboratories have shrunk; expertise has been dispersed; students are staying away from a discipline they consider “unfruitful”, like many other engineering sciences.

Simultaneously, further up in this sector, decision centres have moved away from production centres and away from our country. France still maintains a few important R&D centres within international groups in spite of France’s decreasing weight in world production. However, these groups see the future of R&D as being centred in the emerging countries (China, India...). The main users (transport, energy,...) are losing their experts as are the technical centres on which rely a large network of small and medium businesses. The consequences are alarming in view of the already noticeable loss of technical control.

This trend can and must be reversed. Because of its presence in many industrial sectors and its excellence, metallurgy – including both research and industry – is an essential activity in which France should remain a major player. Provided the political will exists, France has all it needs to restore this field’s unity and dynamism. This requires that industrial policies be redefined.

This report repositions metallurgy in its double role of a science and engineering discipline from two perspectives: first the perspective of *need*, progress being the key to success in many areas such as transport and energy, especially nuclear, to mention only the two most prominent ones; then, the perspective of *opportunity*, metallurgical science and engineering are complex disciplines that feed off each other and lead to many discoveries

that result in technical spin-offs. We are currently at a crossroad. To lose a dominant position in this area is dangerous, to take on a leading position is a challenge that must be met.

The present report is a summary followed by many annexes. It describes first metallurgy as a *science* with strong links to engineering, that is *metallurgical engineering* (chapter 1). The current state of various *industrial sectors* (chapter 2) and of *research and teaching* (chapter 3) is examined. In view of the current trends, which have noticeable effects on employment, R&D and expertise among others, the two academies have proposed to private and public decision-makers a strategy outlined in a series of recommendations (vertical line in text margin). It is recommended that:

1. *Industrial policy* must be redefined and implemented, the problems encountered by metallurgy are only one facet of this policy.
2. Metallurgy, both as a science and an engineering field, should be included in the curricula of engineering schools, universities, CNAM, IUT, BTS (technician training) and others, as a modern scientific and technological discipline that provides many topics of original instruction and major industrial applications.
3. Metallurgical science and engineering should be considered by the major research institutions as ideal interdisciplinary fields that best combine applied and fundamental activities.
4. An *interministerial commission* should be created for 3 years (see chapter 3, recommendation 6), at the initiative of the Ministries in charge of industry, research and education. It should include an equal number of academic and industrial participants, both French and foreign. Within the year following its creation, the *commission* should quickly provide suggestions to the government concerning, in particular, the following points. In the two years that follow its creation, the commission will oversee their implementation.
 - *Training and Research*: measures relative to points 2. and 3. above, in particular the creation of “Pôles” (academic consortia) summarised in point 5. below.
 - *Middle size businesses*: connections should be created with the research community (technical centres and metallurgical engineering facilities, in particular based on local laboratories.
 - *Maintaining in France* a substantial industrial research, with strong links to European research.

5. The *commission*, at the end of a rigorous procedure, should create a certain number (2 to 4) of teaching/research consortia (or metallurgical institutes, see chapter 3, recommendation 8) to strengthen collaborations between public laboratories and industrial research centres (French and European), in particular through reciprocal exchange of researchers.

The objective of the report is that metallurgical industry, which has created wealth and employment and has close ties to many economic activities, maintains in France the prominent position that it has successfully reached and that its recent decline (research/innovation/production) be stopped using the consortia mentioned in 5.

The current state of metallurgy in France is not good. It can rapidly become catastrophic if nothing is done to remedy to it quickly.

Foreword

This report was written to alert public authorities and public opinion on the worrisome state of metallurgy in France, both a refined science and an important industrial activity. The report focuses on the current state of this field of activity in view of its recent past and puts forward recommendations. It does not attempt a global prospective vision, in particular at the economic level. This task will be undertaken by the *Interministerial Commission* mentioned above, provided it is created by the three Ministries concerned as a follow-up to the recommendations of this report.

The reader might note a paradox, even a contradiction, in this report. On the one hand, a broad area of education, research and innovation is described as suffering wide disaffection (chapters 1 and 3). On the other hand, an industry that is still considerably productive and employs many people (chapter 2) is described as being in relatively good health, even excellent in some instances, and not subject to disengagement. Where is the contradiction?

There is none. This valiant and powerful industry presents a huge inertia – in the best sense of the word. Hence, it pushes forward for the greater part on its own momentum that until now has been of high quality, but its future is uncertain. Already it has difficulties recruiting, which will only get worse. The education system does not train the researchers, engineers and technicians needed to maintain French metallurgy in its position of excellence. The effects of globalisation add an extra load, the trend being to outsource whole areas of research and even production.

Hence, the metallurgy of our country – and in some instances, of Europe – is endangered.

The report was written by a workgroup created by both academies. It has benefitted from the contribution of many French and foreign metallurgists, whom we sincerely thank, in particular the major participation of our colleague Yves Bréchet.

We thank Joëlle Fanon for her exemplar editing of this document.

Yves Quéré
André Pineau

INTRODUCTION

La Métallurgie ?

D'un côté tout un pan de l'histoire de l'humanité ; de l'autre un défi contemporain d'une portée considérable, encore que mal perçu du public.

D'un côté les fondeurs et les forgerons du passé, et l'accumulation de leurs connaissances empiriques ; de l'autre une activité industrielle intense qui, en France, représentait encore, en 2007, près de 1 800 000 emplois directs ou indirects, dont 21 % de cadres, dans 45 000 entreprises environ¹.

D'un côté, une synonymie tenace, sympathique mais réductrice – dans l'inconscient collectif – avec l'*acier**, ses millions de tonnes, ses hauts-fourneaux, ses laminoirs et ses tréfileries, avec la Tour Eiffel, la Lorraine et Le Creusot ; de l'autre, toute une panoplie subtile d'alliages spéciaux pour l'aéronautique, l'électronique, le bâtiment, l'automobile, le nucléaire et d'innombrables autres usages.

Et, dans le même temps, en France, un champ d'études qui, après les belles moissons du demi-siècle passé, se trouve dans bien des cas en jachère : situation alarmante, d'autant plus complexe à gérer que nombre des centres de décision (recherche et fabrication) de notre Métallurgie sont devenus internationaux² et que jeunes chercheurs et ingénieurs font déjà dangereusement défaut. La perte progressive des compétences en ce domaine – tant en recherche qu'en activités industrielles – peut coûter très cher. Inversement, de leur renforcement on attend d'importants dividendes.

¹ *Les statistiques industrielles*, SESSI, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 2004. Voir aussi source UIMM, chapitre 2 § 1 et annexe 1. Il convient de remarquer que ces données statistiques peuvent varier d'une source à l'autre compte tenu de la définition que l'on donne au mot « métallurgiste ».

² Ce n'est bien sûr pas, ici, ce caractère international qui est en cause, mais l'éloignement, géographique et parfois intellectuel, entre les centres de décision, de fabrication et de recherche qui en résulte.

Au chapitre des catastrophes du passé dues à une mauvaise maîtrise de la Métallurgie, on citera le naufrage du Titanic, dont la double coque – soi-disant « insubmersible » – était en un acier riche en soufre, de trop faible résilience* aux températures polaires ; et les graves déboires de nombreux *Liberty ships* eux aussi soumis, dans l’Atlantique Nord des années de guerre, à une transition ductile-fragile* mal maîtrisée dans la construction mécano-soudée. Plus récente, on connaît l’histoire du « barillet » de Superphénix, petite cuve en acier dont les fissurations, banalement non nucléaires, ont été le prétexte initial de l’abandon de ce réacteur à neutrons rapides.

À celui des succès actuels, dus en grande partie à l’amélioration continue des alliages de structure, on mentionnera, entre bien d’autres, la tenue des cuves et des gaines de réacteurs nucléaires, celle des alliages d’aluminium pour Airbus et des aciers du TGV, les performances de la coulée continue comme celles de la Métallurgie des poudres, le succès du viaduc de Millau comme ceux de notre construction navale (méthaniers, paquebots...), l’amélioration remarquable de la sécurité automobile, l’élaboration monocristalline des aubes de turbine, les applications des métaux précieux à la microélectronique, les progrès relatifs à l’hygiène liés à l’usage des boîtes-boisson métalliques, le raffinement des alliages de prothèses, les alliages Fe-Ni du type Invar, pour lesquels Imphy est toujours le leader mondial, ou les aciers utilisés pour la fabrication des palplanches...

La liste des défis du futur est, elle aussi, très longue : citons, pour exemple, l’utilisation énergétique de l’hydrogène, avec le défi métallurgique complexe que représentent la conception et le fonctionnement dans la durée des piles à combustibles, ou aussi le stockage et le transport du gaz.

Des effectifs qui régressent, une production stable...

La situation actuelle de l’industrie métallurgique de notre pays est résumée, activité par activité, en annexe 1, notamment s’agissant de l’emploi, des recrutements et de la production.

Dans ce dernier domaine, la situation est contrastée mais elle se caractérise, en France, au mieux par une stabilisation de la production soit donc, en termes relatifs, une régression³. Ainsi la production d’acier – en particulier – s’est éloignée de l’Europe : de 2000 à 2009, la production mondiale est passée de 800 à 1 350 millions de tonnes (MT), tandis que la production française restait stable à environ 18 MT (2008), que l’on comparera aux 450 MT de la Chine, et aux

³Statistiques de l’Insee.

54 MT de l'Inde qui vise les 120 MT en 2011. Ajoutons que 90 % de la production française provient désormais d'usines appartenant à des organismes ou à des fonds d'investissement sur lesquels l'État n'a plus d'influence. Ainsi de notre perte de contrôle sur la fabrication des rails de TGV à Hayange passée à 100 % sous la direction devenue indienne de Corus (Tata) ; et sur les plaques spéciales pour cuves de centrales nucléaires, à 100 % ArcelorMittal.

On notera, comme événements récents, les fermetures en 2006 des aciéries électriques de l'Ardoise (30), d'Isbergues (62), de Gandrange (57) en 2008 ; à terme, celle du Cheylas (38)⁴.

Pour les décennies à venir, on estime que la consommation d'acier par personne et par an devrait se stabiliser aux alentours de 300 kg. Pour 9 milliards d'individus, population prévue en 2050, la production devrait donc atteindre 2 700 MT. Grâce au recyclage et à l'abondance du minerai de fer, cet objectif est atteignable. Il faudra alors résoudre les énormes problèmes posés par les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie. La participation de la France à cette production ne peut que devenir marginale. Seul un effort déterminé de recherche, et donc une amélioration constante de la qualité des produits, peut dans ce domaine nous maintenir en position visible ou, mieux, influente.

Les tendances sont comparables pour les autres métaux. Ainsi en France, la production d'*aluminium* décroît régulièrement (par exemple de 0,45 MT en 2003 à 0,39 MT en 2008) tandis que la production mondiale subit une croissance considérable (égale à 23 MT en 1993, elle a été de 40 MT en 2008), la France n'y contribuant plus que pour 1 % malgré sa position forte dans la production d'énergie électrique. Pour le *cuivre*, la production française mensuelle moyenne de tubes et tuyaux est tombée de 180 000 tonnes en 2000 à 85 000 tonnes en 2008. Pour le *plomb*, en dehors des activités de recyclage, elle est tombée à zéro avec la disparition de Metaleurop en 2004. Il en est de même pour d'autres métaux comme le *zinc*.

Quant aux effectifs de la branche « Métallurgie », ils ont évolué, en France, ces dernières décennies, comme suit :

1983	1993	2008 (source syndicale)
2 336 000	1 752 000	1 572 000

⁴J.-L. Montagut, S. Graffard :

<http://www.calamea.com/read/000011126b22ebc33a97a?authid=WBb6a6P5Qftj>

ces chiffres reflétant conjointement la contraction industrielle ci-dessus et une augmentation de productivité considérable.

Plus généralement, les *États généraux de l'Industrie* ont récemment (mars 2010) souligné comme suit la situation inquiétante reflétée ci-dessus pour la Métallurgie : « La part de l'industrie manufacturière dans la valeur ajoutée marchande représente en France environ 16 % alors que la moyenne dans zone euro s'établit à environ 22 % et que cette part atteint 30 % en Allemagne. La part de l'industrie en France ne cesse de diminuer il s'agit de mettre un terme à cette tendance [...] de sorte qu'elle atteigne plus de 15 % en 2015 ».

... des centres de gravité qui se sont éloignés de la France

Au niveau mondial et contrairement à l'image courante, la Métallurgie est en forte expansion tandis que la production stagne dans les pays développés et que les centres de décisions se déplacent vers les pays émergents. Ainsi, pour l'acier, les 5 plus grands groupes mondiaux sont dirigés par des représentants de pays émergents (ou du Japon).

Ce déplacement des centres de décision à partir de notre pays a été particulièrement net, ces deux dernières décennies, s'agissant de la quasi-totalité de la production d'acier et d'aluminium. Dans le premier cas, on se rappellera l'acquisition de Unimétal par Ispat (devenu Mittal Steel), puis d'Arcelor par Mittal Steel (2006). Dans le second, on citera l'acquisition de Pechiney par le groupe canadien Alcan (2003), puis d'Alcan par le groupe anglo-australien Rio Tinto (2007). Dans les deux cas, au-delà d'une meilleure répartition géographique des marchés, ces deux groupes étrangers ont cherché à s'appuyer sur la haute qualité des technologies et de la R&D des deux entreprises françaises. On ajoutera, entre autres, l'acquisition de Tréfinmétaux (transformation du cuivre, Pechiney) par KME (Italie) en 1988, celle de Cezus Titane par Timet (États-Unis), celle de Howmet (Pechiney) par Alcoa, celle de Manoir Industries (forge d'aluminium, titane, superalliages...) par le fonds américain Sun Capital Partners (2007)...

Il convient d'ajouter que cette internationalisation des centres de décision (notamment hors d'Europe) entraîne, positivement, une politique de ressources humaines favorable – pour les ingénieurs et cadres, en production comme en R&D – aux profils multiculturels.

... une recherche technique qui résiste en partie...

Les questions posées par cet exil des centres managériaux ne sont pas traitées dans le présent rapport qui, en revanche, s'intéresse à l'évolution des centres de décision techniques, domaine où l'Europe « résiste ».

Pour l'*acier*, la R&D de trois des cinq premiers groupes se trouve encore majoritairement en Europe. Les recherches relatives à ce matériau sont réparties entre divers centres comme ceux, de Montataire, Isbergues et du Creusot. Le centre de Maizières-lès-Metz accueille encore 550 chercheurs qui ont dû se spécialiser sur certains créneaux : procédés, produits pour l'automobile et l'emballage (*packaging*), laissant le reste à d'autres centres de recherche dans le monde. Dans le même temps, ont été fermés les centres de Dunkerque, de Firminy et de Fos-sur-Mer.

Pour l'*aluminium*, le centre de recherches de Voreppe, où Alcan CRV demeure le plus important en Europe avec environ 200 ingénieurs et techniciens. Il travaille à l'innovation des produits et à la performance des procédés.

... un effort universitaire qui s'émiette et un enseignement qui s'affaisse

L'accent mis par les pouvoirs publics sur d'autres technologies a pour effet de diminuer le volume de la recherche publique en Métallurgie et, paradoxalement, d'augmenter l'émiettement des compétences entre chimie, mécanique et physique. Les données qui suivent (où le vocable « métallurgiste » désigne « chercheur en Métallurgie ») n'ont pas une précision extrême (d'où le signe ~) en raison de la non-appartenance des métallurgistes à un cadre administrativement défini. Il reste que – à cette réserve près – ils sont éloquents.

Dans les deux grands organismes publics importants que sont le CEA et l'Onera, la chute des recherches en Métallurgie, ici nucléaire et aéronautique, apparaît dans les données suivantes :

- au CEA (région parisienne)⁵ : ~ 80 métallurgistes en 1980 ; ~ 45 en 2009 ;
- au CEA (Grenoble) : ~ 45 métallurgistes en 1980 ; ~ 15 en 2009 ;
- à l'Onera : ~ 45 métallurgistes en 1980 ; ~ 30 (d'âge moyen 55 ans) en 2009.

⁵Par souci de comparaison valable, nous considérons ici les ensembles (bien définis) « recherche métallurgique fondamentale » des Centres d'études nucléaires de Fontenay-aux-Roses (« DECPu ») et de Saclay (« SRMA » et « SRMP »).

Il convient avant tout de donner, d'un « métallurgiste », une définition simple qui puisse le distinguer d'un pur physicien ou d'un pur chimiste et qui corresponde à la fois à la réalité des laboratoires, publics et industriels, et à l'esprit du présent Rapport.

Est dit ici *métallurgiste* celui qui, formé à la physique, à la chimie et à la mécanique, au minimum sait lire et utiliser un diagramme de phases (sans croire que celui-ci dit tout sur l'alliage); qui connaît l'existence et les propriétés des défauts cristallins responsables de la plasticité et du transport de matière, ainsi que les fondements théoriques et pratiques de la rupture et de la corrosion; qui utilise ces compétences sur la face expérimentale ou sur la face théorique de la Métallurgie ou, mieux, sur les deux; et qui possède une culture suffisamment large pour, connaissant la composition d'un alliage métallique, avoir déjà une assez bonne intuition des principales de ses propriétés.

On retrouve cette tendance, de manière plus globale, en considérant l'évolution des affiliations à la *Société française de Métallurgie et des matériaux* – bonne représentation du poids de la recherche métallurgique en France – dans les récentes années. Ainsi :

- en Île-de-France, 517 membres en 1980, 229 membres en 2009, soit – 56 %;
- en régions Nord-Lorraine : 320 en 1980, 171 membres en 2009, soit – 47 %;
- en région Rhône-Alpes : 117 en 1980, 131 membres en 2009, soit + 12 %;

soit, pour l'ensemble de ces régions, une diminution – considérable – de 44 %, malgré la bonne résistance de la région Rhône-Alpes (grâce à l'INPG de Grenoble et à l'Insa de Lyon).

S'agissant d'enseignement, les filières, naguère nombreuses, dynamiques et attractives, se sont raréfiées (*cf.* chapitre 3), à l'université comme dans les grandes écoles. L'enseignement de Métallurgie a été fortement réduit dans ces dernières où il jouait naguère un rôle important (écoles des mines, écoles centrales...). À l'École polytechnique, où la Métallurgie tenait une place sensible, il a disparu, etc. De ce fait on constate, dans notre pays, une pénurie de jeunes métallurgistes bien formés et les centres industriels, en particulier dans l'industrie nucléaire, devront, en raison de la relance de cette industrie, embaucher chercheurs et jeunes ingénieurs à l'étranger, solution bonne en soi mais évidemment

insuffisante. Comment – par exemple – des industriels comme Alstom ou Areva vont-ils pouvoir, le premier concurrencer Siemens en Chine ou Bombardier en France, le second mener recherches et réalisations en 4^e génération de réacteurs à fission, s'ils perdent leur compétence en Métallurgie par manque d'un vivier national de jeunes recrues brillantes ?

Un assèchement à redouter

Si, au total, la tendance au regroupement des industries métallurgiques en pôles de taille mondiale paraît inéluctable, il faut éviter que cette évolution entraîne une perte de vitesse ou d'importance de la France dans ce domaine clé. Si les grands acteurs mondiaux ne peuvent plus s'appuyer, comme encore récemment, sur une recherche et un enseignement publics français forts, l'ensemble du système s'asséchera et migrera ailleurs. Qui plus est, la perte de substance ira bien au-delà de la R&D, frappant en particulier le tissu des PMI/PME qui tenait grâce au soutien direct ou indirect des réseaux existants de centres techniques et de laboratoires publics et industriels, soutien en voie de disparition.

Ceci est d'autant plus vrai que les pays émergents et/ou non-européens ne vont pas se contenter de produire des millions de tonnes de métal sur des données techniques reçues d'Europe. En fait, le développement de la recherche, publique et privée, s'y accentue. Ainsi, les citations annuelles d'articles chinois contenant le mot « acier » ont été multipliées par plus de 3 depuis l'an 2000 ; en 2008, les métallurgistes japonais ont déposé 3 fois plus de brevets que leurs collègues européens (« seulement » 50 % de plus en 2000). Cette comparaison sur le nombre de brevets doit être tempérée par le fait que la notion de brevet n'est pas la même dans tous les pays. Dans le même temps, la Corée a multiplié sa production d'acier par 3. Il est à prévoir que la Chine emboîte le pas du Japon (d'abord des publications, puis des brevets) et que l'Inde suive de peu.

Une condamnation à l'excellence

Des constats et considérations qui précèdent, une première conclusion – conclusion d'étape – s'impose. Notre pays ne peut ni, sans doute, ne doit s'épuiser à une course, perdue d'avance, à des millions de tonnes partis sous d'autres cieux, plus proches des centres de transformation. En revanche, s'impose à lui de conserver, et surtout d'améliorer encore, les positions fortes qu'il a acquises en termes de recherche, ainsi qu'en produits à forte valeur ajoutée et en compétences accumulées. Ces positions se situent dans les domaines de l'innovation

technologique et de la valeur scientifique, sur des sujets aussi variés que la mise en forme, les diminutions des coûts, ou la découverte de niches nouvelles...

Un mot s'impose ici : l'excellence. Excellence nécessaire de nos laboratoires de Métallurgie, industriels ou universitaires, de leurs liens avec le tissu PMI/PME, de notre enseignement, en tant qu'il court du collège aux universités et aux grandes écoles... L'Europe en général, et la France en particulier, ne pourront garder une place de leader (sur certains segments) qu'en choisissant avec soin les créneaux où faire porter l'effort et, surtout en y maintenant celui-ci en évitant les *stop and go*.

Ici évoquée, l'excellence est actuellement menacée. Nous sommes condamnés au minimum à l'entretenir et, mieux, à la développer.

L'ambition du présent rapport...

... est, dans ces conditions, de montrer :

- que la Métallurgie constitue une discipline scientifique à part entière, à la fois aux frontières du *savoir* et au cœur du *produire* (chapitre 1), discipline dont les progrès bénéficient à la science des autres matériaux ;
- que, inévitablement présente dans des champs innombrables de *l'industrie*, elle y est source de progrès et réservoir d'emplois ; qu'elle constitue souvent l'élément bloquant de projets ambitieux ; que la négliger peut conduire à de graves déboires ; et qu'elle reste un champ riche en défis et en découvertes à faire (chapitre 2) ;

Rappelons, à titre d'exemple, que la décision politique d'embargo sur l'acier européen que voulait prendre, il y a quelques années, le gouvernement américain a été vivement rejetée par l'industrie automobile des États-Unis qui ne pouvait se passer de ces aciers, faute d'avoir su garder une sidérurgie vivace et innovante : l'indépendance du politique est, elle aussi, menacée s'il y a faiblesse dans un domaine stratégique tel que la Métallurgie.

- qu'il faut du temps pour construire les compétences indispensables, tant scientifiques que techniques, et qu'un rien suffit à les détruire : « soustraire » ou « externaliser » l'expertise en Métallurgie crée une dépendance dans des domaines stratégiques et se paie cher, à terme ;

- que – à des degrés divers suivant les secteurs – elle a perdu, en France, une grande part de sa substance, en raison à la fois de multiples réorganisations industrielles récentes et d'un désengagement du monde académique, largement dû aux effets de mode (chapitres 1 et 2) ;
- que des mesures urgentes, dans l'enseignement, la recherche universitaire et industrielle, l'information du public, la sensibilisation des décideurs et des acteurs... doivent être impérativement prises.

Les points précédents sont développés en deux registres :

- un texte synthétique (le présent document) décrit en trois chapitres l'état actuel de la discipline (chapitre 1) ; décline quelques-uns de ses principaux champs industriels (chapitre 2) ; qu'il est naturel de présenter avant l'effort national de recherche et de formation (chapitre 3) dont on indique les points fragiles, voire sinistrés. Il énonce enfin une série de recommandations visant à renforcer ce qui est fragile et à rebâtir ce qui est sinistré ;
- un développement plus étoffé (annexes sur le CD ci-joint) reprend plus en détails certains des thèmes en les illustrant d'exemples concrets et en les précisant par de nécessaires données numériques.

Les recommandations relatives à chaque paragraphe sont repérées par un trait vertical en marge gauche.

- Une bibliographie fait état d'ouvrages en relation avec le sujet.
- Un glossaire donne des définitions simples des mots marqués d'une étoile *.

Vj k' r ci g' l p v g p v k p c m { ' i g h v ' d i e p m

CHAPITRE 1

La *Métallurgie*, une science
à part entière

Vj k' r' ci g' l' p' v' g' p' v' k' p' c' m' { ' i' g' h' v' ' d' i' e' p' m

1 | La Métallurgie, mère de la science des matériaux

En raison de son passé plusieurs fois millénaire – qu'elle ne partage guère qu'avec l'astronomie – et de l'ampleur de ses applications, la Métallurgie est parfois considérée comme une activité plus proche des arts et des métiers que d'une discipline scientifique rigoureuse. Elle est en fait à la fois ceux-là et celle-ci. C'est à cette discipline que s'attache le présent chapitre où nous la verrons emprunter ses outils principalement à la physique, à la mécanique, à la chimie et aux mathématiques, tout en en créant de nouveaux. Science à part entière, elle participe des disciplines ci-dessus sans être réductible à aucune d'entre elles.

Ayant fait entrer nombre de ces outils dans l'étude de substances non métalliques, elle a largement contribué à créer la « Science des matériaux », et elle continue à la nourrir d'exemples, de concepts et de méthodes expérimentales et théoriques. Le présent rapport sera cependant fidèle à l'étymologie et sera consacré exclusivement aux *métaux* et *alliages*, à l'exclusion des autres matériaux que sont les semi-conducteurs, le verre, les polymères, le ciment... auxquels il ne sera fait que de brèves allusions. Le domaine ainsi défini demeure immense, des méthanières de plus de 100 000 tonnes aux brasures microscopiques des *chips*, ou des gaines de combustibles* nucléaires aux prothèses chirurgicales.

En fait, le succès de la Métallurgie tient en cinq mots : l'*abondance* des métaux dans la croûte terrestre ; leur grande *malléabilité* ; la capacité qu'ils offrent de modifier leurs *propriétés mécaniques* par des traitements thermomécaniques ; l'extraordinaire maîtrise de nombreuses *technologies associées*¹ ; enfin la *conduction* – électrique et thermique – caractéristique des métaux et alliages et le magnétisme de certains d'entre eux.

Ce n'est que dans la seconde moitié du XX^e siècle que des progrès majeurs ont fourni l'explication de comportements qui intriguaient Lamé en 1840 (cf. encadré) et leur modélisation « à l'ordre zéro ». On y dégage le rôle majeur des défauts cristallins* dans le comportement macroscopique des matériaux, et celui de la microstructure, passage obligé d'une compréhension des relations entre les paramètres des procédés d'élaboration et les propriétés d'usage recherchées. Subsistent cependant de vastes zones d'ombres. (cf. § 2. à 5.).

Cette étape a été concomitante d'un progrès considérable de la Métallurgie pratique : alliages légers (aéronautique), aciers (dont les inox, les invars*, les alliages de nickel...), « superalliages », nouveaux métaux notamment pour

¹ D'où le bon marché de la plupart des métaux d'usage courant. Sait-on que le prix d'un kilogramme d'acier courant équivaut sensiblement à celui d'un litre d'eau minérale ?

l'énergie nucléaire (zirconium, uranium...), micro- (aujourd'hui nano-) métallurgie des composants pour l'électronique et l'optoélectronique, etc. en sont de brillants exemples.

« La plupart des métaux acquièrent de l'élasticité lorsqu'ils sont battus à froid [...] On dit alors qu'ils sont *écrouis*; s'il importe de leur donner de la ductilité, il faut pour cela les *recuire*, c'est-à-dire les chauffer au rouge et les laisser refroidir lentement. Certains corps deviennent très élastiques par la *trempe* [...]. L'acier [...] est d'autant plus dur et élastique que la trempe produit un abaissement subit de température plus considérable; en général, il perd une partie des propriétés que la trempe lui donne, lorsque sa température s'étant élevée s'abaisse ensuite lentement [...]. L'alliage de cuivre et d'étain² dont sont composés les cymbales et les tam-tams, contrairement à ce qui se passe dans l'acier [...] acquiert de la dureté et de l'élasticité par refroidissement lent, devient ductile et malléable par la trempe. La cause de ces effets et de ces différences est encore inconnue. »

Gabriel Lamé, Cours de Physique, École polytechnique, 1840, 7, § 125.

On notera que, du fait de la complexité de son objet, la Métallurgie n'est pas axiomatisée comme l'ont été par exemple l'électrodynamique, la mécanique, ou la thermodynamique. Dans ce contexte, la poursuite de la recherche y est moins aiguillonnée par les zones d'ombre restantes que par les problèmes pratiques posés (durées d'usage allongées, association métaux/autres matériaux...), par les progrès des techniques expérimentales et numériques, et par les idées théoriques que la Métallurgie suscite. D'où les perspectives entièrement renouvelées d'une science moderne qui trouve en elle-même, et dans un champ inépuisable d'applications, la source de sa propre dynamique.

Ainsi, les progrès *instrumentaux* (microscopie électronique, tomographie, etc.), *théoriques* (théorie des dislocations, diffusion à l'état solide, liaison métallique...)³ et *numériques* (souvent issus de la physique statistique⁴ ou de la mécanique des milieux continus...) ont bouleversé notre compréhension des métaux. La révolution instrumentale qui se poursuit de plus belle et la croissance de la puissance des ordinateurs (cf. § 5.), démultiplient actuellement les possibilités de progrès en Métallurgie et en science des matériaux. Sa transition de science *explicative* à science *prédictive* ouvre en particulier les perspectives inédites d'une conception de matériaux « sur mesure ».

²Le bronze.

³À titre de repères importants, la parution du livre *Les Dislocations* de J. Friedel et la percée de la microscopie électronique par transmission de P.-B. Hirsch datent tous deux de 1956.

⁴Algorithmes de Verlet en dynamique moléculaire; de Rosenbluth et Métropolis en méthode de Monte-Carlo.

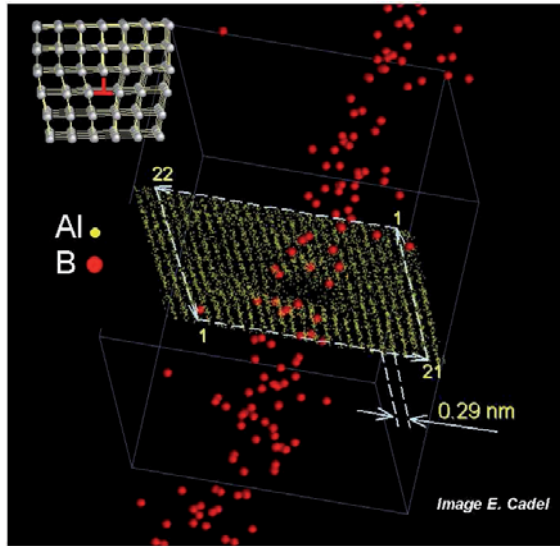


Figure 1.1

Ségrégation de bore sur une dislocation dans un alliage FeAl dopé au bore. Image obtenue par tomographie atomique (Emmanuel Cadel et Didier Blavette, Rouen).

Au long de ce chapitre, le caractère profondément transversal de la Métallurgie sera illustré, intégrant chimie, physique, mécanique et technologie au plus haut niveau. C'est bien cette transversalité qui en fait une discipline idéale pour la formation des élites techniques. Ajoutons qu'il s'est créé, en France notamment, un tissu de relations serrées entre la recherche publique, les centres de R&D industrielle, et nombre d'utilisateurs et de PME/PMI au travers des centres techniques. Au total donc, un vaste thème de recherche de haut niveau, pluridisciplinaire, très couplée avec la vie économique du pays.

Les disciplines ainsi concernées sont nombreuses, parmi celles que nous n'avons pas traitées ci-dessous, mentionnons la thermique, la mécanique des fluides, la tribologie, les traitements de surfaces...

2 | Métallurgie physique et physique du métal

Après plusieurs millénaires de pratique d'une Métallurgie empirique, le XX^e siècle a vu l'écllosion d'une *Métallurgie physique*, fondée sur la double question de la structure atomique des métaux et alliages (comment les atomes y sont-ils

empilés ?) et de leur structure électronique (comment les électrons s'y comportent-ils et comment en assurent-ils la cohésion ?).

Les métaux sont caractérisés par une forte délocalisation de certains de leurs électrons, d'où la notion d'*électrons libres*⁵ et d'où ce fait qu'ils sont de bons conducteurs de l'électricité et de la chaleur, et d'autant meilleurs de l'une que meilleurs de l'autre. D'où, aussi, bien d'autres propriétés des métaux : leur relativement bas point de fusion, dû à des liaisons peu dirigées entre les atomes, leur magnétisme éventuel, leur capacité à former des solutions solides parfois étendues⁶, et un empilement des atomes à structure souvent simple⁷.

Un acquis essentiel de la Métallurgie physique tient en ce que ces empilements, tout simples qu'ils soient, ne sont pas parfaits : des *défauts* s'y trouvent (par exemple absence d'un atome là où il devrait y en avoir un, défaut appelé *lacune*⁸) et que, paradoxalement, ce sont ces défauts – quoiqu'en faible concentration – qui sont cause de bien des propriétés des métaux : comportement plastique (cf. § 3.), vieillissement (évolution dans le temps), effet des traitements thermomécaniques... Ces effets sont la manifestation, à l'échelle macroscopique, de la dynamique de la population des défauts dont l'organisation forme ce qu'on appelle la *microstructure*.

C'est à une bonne maîtrise de la physique des défauts que l'on doit, entre bien d'autres, la compréhension du durcissement des alliages d'aluminium par ordre local attractif du soluté – condition *sine qua non* du développement de l'aviation – ainsi que leurs constantes améliorations. Cette avancée d'extrême importance a été due, pour beaucoup, au physicien français André Guinier.

2.1 Techniques...

La Métallurgie bénéficie, depuis peu, d'outils d'observation d'une efficacité jusque-là inégalée : sonde atomique qui permet d'analyser, atome par atome, des volumes de $\approx 1 \mu\text{m} \times 100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ (Rouen) ; rayonnement synchrotron (ESRF/Grenoble ; Soleil/Saclay...) ; diffusion de neutrons ; microscopies électroniques à haute résolution ; techniques à champ proche... Elle bénéficie aussi de l'explosion de la puissance des ordinateurs (cf. § 5.), qui permet désormais de

⁵Locution entrée dans le langage courant.

⁶... comme l'argent, ou le platine, dans l'or de nos alliances.

⁷...comme celle du fer popularisée par l'*Atomium* de Bruxelles, dont les sphères figurent des atomes.

⁸Autre exemple : les *dislocations*, défauts linéaires responsables de la plasticité des métaux (voir J. Friedel : *Les dislocations*, Gauthier-Villiar, 1956).

modéliser certains phénomènes à partir de la microstructure qui en est responsable.

2.2 ...et problématiques

Mais ces progrès laissent ouverts nombre de problèmes – d’anciens non résolus, et de nouveaux – notamment dans les grands thèmes qui touchent à *la structure électronique* (stabilité des phases, ordre local – attractif ou répulsif –, effets de taille...); aux *défauts* (cœur des dislocations...); aux joints de grains et aux interfaces; aux propriétés des agrégats, *nanopolycristaux* et *couches minces*; à la *conception d’alliages nouveaux* et leur choix pour un usage donné; à la prévision de leur *comportement à long terme*, celui-ci dépendant largement de celle-là, c’est-à-dire de la microstructure initiale du matériau, elle-même héritée de la solidification et modifiée par les traitements thermomécaniques subis. Cette évolution du matériau au cours du temps – fonction des sollicitations⁹ qu’il subit – est une donnée capitale (et souvent mal évaluée) en termes d’économie, de sûreté, et d’écologie.

La France a acquis là une position reconnue, mais l’effort entrepris au cours des 5 ou 6 dernières décennies s’amointrit – en nombre d’équipes et en qualité du recrutement. Il devrait au contraire s’amplifier, vu les défis technologiques à résoudre. Aussi souhaitons-nous :

- en termes de recherche, l’existence affirmée d’une activité vivante de Métallurgie physique dans des « Pôles enseignement-recherche de Métallurgie » à vivifier, ou créer (cf. chapitre 3, recommandation 8), de très nombreux problèmes importants restant à résoudre ;
- parmi ces derniers, on citera sans être exhaustif : la stabilité des phases, l’ordre local (attractif ou répulsif) dans les solutions solides, les couplages magnétiques, effets de taille, structure de cœur des dislocations en relation avec la dureté des superalliages à chaud ou la fragilité du fer alpha à froid, etc. ;
- à destination des étudiants, l’affichage de la Métallurgie physique comme matière d’ouverture idéale pour ceux voulant à la fois pratiquer une science moderne, intrinsèquement interdisciplinaire, et entrer en contact avec le monde industriel, où la Métallurgie tient une place majeure (cf. chapitre 2) ;

⁹...au sens large : aussi bien les contraintes mécaniques, statiques ou cycliques, que l’irradiation par les neutrons dans un réacteur nucléaire, ou que les réactions chimiques au contact de divers agents.

- à destination des chercheurs et enseignants-chercheurs, la relance d'écoles d'été annuelles de Métallurgie physique à l'image de celles qui avaient été créées par le CEA dans les années 1960, et surtout l'obligation de passer des séjours substantiels (3 mois au moins tous les 3 ans ?) dans des laboratoires étrangers de haut niveau, notamment européens.

3 | Métallurgie et mécanique

Pendant des siècles, les métaux – et plus généralement les solides d'usage commun (roches, terres cuites, bois...) – furent assimilés à un milieu continu, représentation à la fois propice au traitement mathématique et plausible. C'est ainsi que Hooke, contemporain et rival de Newton, étudiant le métal des ressorts de pendule, énonçait à sa manière (« *Ut tensio, sic vis* », 1678) la linéarité entre effort et déformation, début de la longue histoire de la mécanique des solides où des mathématiciens comme Cauchy et des physiciens comme Poisson allaient s'illustrer. Déclinée en élasticité, plasticité, viscoélasticité, cette discipline constitua durablement, à l'usage des étudiants et pour les ingénieurs, la théorie des solides, et celle des métaux, jusqu'à ce que, vers les années 1950, débutent les enseignements de physique des solides et de métallurgie physique. De cette dualité d'approches, l'une microscopique (cf. § 2.), l'autre macroscopique (le présent §), devaient naître des débats d'abord ici ou là rugueux, mais bientôt fructueux.

Deux thèmes principaux ont d'emblée alimenté les échanges : la plasticité d'une part, lorsque le lien conceptuel a été reconnu entre dislocations et incompatibilité plastique ; le passage du monocristal au polycristal d'autre part, lorsque la jeune mécanique des matériaux composites a su traiter le polycristal comme un « composite » particulier, dont les « phases » sont constituées par les familles de grains de même orientation cristallographique. Il en est résulté des progrès importants et rapides dans la compréhension et la description de l'écroissage ou de la plasticité de transformation, dans la prévision des textures cristallographiques et de l'anisotropie plastique, dans l'analyse de la solidification ou de la recristallisation, etc.

De nombreux autres domaines se sont, depuis, ouverts à cette fertilisation croisée, notamment celui de l'endommagement et de la rupture (annexe 2).

La « Métallurgie mécanique à la française » a ainsi conquis de fortes positions et une large reconnaissance. La Métallurgie apporte là un flot continu de nouveaux problèmes et fixe les phénomènes à prendre en compte, les échelles pertinentes (approches « multi-échelles ») et les approximations admissibles ;

la mécanique introduit ou renforce la rigueur et la généralité des traitements, le souci du quantitatif, l'accès au macroscopique et aux applications. L'une et l'autre en ressortent enrichies, la première confortant sa dimension de science pour l'ingénieur en s'ouvrant à la mise en forme ou à la durabilité, et la seconde investissant les échelles fines et la modélisation de systèmes aléatoires complexes.

L'École française de la mécanique des matériaux est notamment à l'origine de ce qu'il est convenu d'appeler maintenant « l'approche locale de la rupture » qui a largement abouti dans la mesure où elle fait l'objet d'une norme ISO 27306 :2009, proposée initialement par les chercheurs japonais afin de mieux évaluer la nocivité des défauts dans la construction métallique. Cette approche, contrairement à l'approche globale de la rupture trop réductrice et inapte à rendre compte de chargements complexes tels que ceux rencontrés dans la pratique, combine une analyse mécanique fine des champs de contrainte et de déformation à la pointe d'une fissure et la prise en compte de critères de rupture établis physiquement. Voir l'annexe 2 pour plus de détails.

Il y a lieu de souligner ici le rôle considérable rempli dans les années 1980 par le GRECO¹⁰ « Grandes déformations et endommagement » et par les deux GIS¹¹ associés (« Mise en forme » et « Comportement à haute température »). Ces actions ont largement contribué à la renommée de l'École française de la mécanique des matériaux.

À la Métallurgie s'impose de plus en plus une approche multi-échelles où l'on tente de rassembler en une vision unique ce qui se passe depuis l'échelle atomique jusqu'à celle de la pièce macroscopique. Ainsi, pour un objet donné (wagon, grillage, aile d'avion...), la rigidité est contrôlée au niveau des liaisons atomiques ($\approx 0,1$ nm), la résistance mécanique l'est à l'échelle de la microstructure (taille des grains, ... $\approx 10^3$ à 10^4 nm), et la rupture par la longueur de la fissure critique ($\approx 10^7$ nm), soit près d'une dizaine d'ordres de grandeur.

La dernière décennie a connu de multiples avancées, favorisées par le renouvellement des techniques expérimentales et l'explosion du numérique. On peut citer :

- la combinaison de la dynamique des dislocations et de la méthode des éléments finis* permettant, par le traitement numérique rigoureux de problèmes aux limites, de franchir un nouveau pas vers le macroscopique ;
- le développement de méthodes variationnelles, lors du passage monocristal/polycristal, et la mise au point associée de nouvelles méthodes, plus précises, d'estimation du comportement global, jouissant d'une plus

¹⁰GRECO : Groupement de recherches coordonnées.

¹¹GIS : Groupement d'intérêt scientifique.

grande sensibilité au comportement intracristallin ; leur extension à la prise en compte de mécanismes de déformation par changement de phase ou par maillage* ;

- l'introduction de traitements mécaniques adaptés (méthodes de « second gradient », milieux de Cosserat...) pour exprimer des effets de taille ou de longueurs internes, particulièrement importants pour les métaux nanocristallins ou les mousses métalliques ;
- le développement de « l'approche locale de la rupture », permettant notamment de passer de la formation, de la croissance et de la coalescence de cavités ductiles, à la fissuration macroscopique et à la rupture ;
- la mise au point de méthodes d'identification du comportement intracristallin par mesures micro-extensométriques de champs sur polycristaux, simulation numérique de la réponse mécanique sur microstructures réelles et optimisation, renouvelant le dialogue entre Métallurgie physique et mécanique, jusqu'ici souvent tributaire d'expérimentations sur monocristaux.

Aux recommandations du § 2, on ajoutera quelques-unes des priorités à se fixer de manière urgente :

- la prise en compte de la montée des dislocations dans les descriptions micro-mécaniciennes (fluage* d'irradiation...) ; la description de la diffusion de défauts ponctuels sous contraintes et, plus généralement, l'introduction des contraintes dans les calculs et modèles physiques de défauts ;
- la compréhension et la modélisation de l'influence de la précipitation et de la solution solide sur l'érouissage, du développement des textures de recristallisation comme de la relation entre microstructure, comportement cyclique et durée de vie en fatigue ;
- le développement de méthodes de simulation véritablement multi-échelles alliant rigoureusement traitements discrets et continus dans les nombreuses situations où les échelles ne sont pas découplées ;
- le renforcement de la composante chimique dans le dialogue Métallurgie/mécanique en termes d'oxydation, de corrosion et, plus généralement, de tenue à chaud des alliages.

4 | Métallurgie, chimie et thermodynamique

La chimie est présente à tous les stades de l'activité métallurgique et, d'abord, à l'élaboration du métal brut et des alliages. L'extraction des métaux à partir du minerai n'a cessé de progresser, de manière soit évolutive soit révolutionnaire.

Révolution, en tout cas, pour l'aluminium, élément découvert par Humphry Davy en 1807, métal initialement élaboré à l'échelle du gramme par réduction chimique de l'alumine – en France, à l'École normale supérieure – et donc métal précieux, plus cher que l'or, avant le bouleversement de sa production par électrolyse (Paul Héroult et Charles-Martin Hall, 1886). Si précieux que l'orfèvrerie Christofle, grand nom de « l'argenterie » française, avait offert à Napoléon III, lors de l'Exposition universelle de 1855 et à titre de cadeau somptueux, un couvert en aluminium !

4.1 Métallurgie et chimie : un long compagnonnage

Cette présence se manifeste sous trois grands volets :

- Métallurgie extractive et chimie ;
- Chimie et propriétés d'usage des matériaux métalliques ;
- Chimie et conception des métaux et alliages.

La Métallurgie débute avec l'exploitation du minerai, dont on extrait le métal par divers procédés chimiques de dissolution, de réactions d'oxydoréduction, et de purification. Loin d'être une discipline figée, la Métallurgie extractive est un domaine plus que jamais revitalisé à la fois tant par les évolutions des besoins industriels en aval que sous le poids des nouvelles contraintes environnementales :

- par l'optimisation de procédés classiques : la réduction des émissions, et notamment celle de CO_2 , est une force motrice importante pour améliorer les étapes amont de réduction du minerai, qu'il s'agisse de l'acier ou des alliages légers, et celles de la chaîne aval, par exemple pour les traitements de surface permettant de fonctionnaliser le matériau de base et lui permettre de répondre à des cahiers des charges toujours plus exigeants ;
- par le développement de nouvelles méthodes d'extraction qui rendent un métal ou un alliage industriellement et économiquement viable. Ainsi de l'aluminium (cf. encadré ci-dessus) et, plus près de nous, des nouveaux procédés d'élaboration du titane et du magnésium qui lèvent des verrous pour le développement de ces matériaux à plus grande échelle ;
- par l'introduction des résultats obtenus lors de l'analyse des cycles de vie (ACV). La dématérialisation et le recyclage des pièces en fin de vie conduisent les producteurs à imaginer des chimies d'alliage originales, qui permettront à l'ingénieur de mettre en œuvre des matériaux dont la composition sera évolutive au gré des recyclages successifs.

Impressionnants également, les progrès des méthodes d'affinage des aciéristes et la précision dans les ajustements des compositions, essentielle pour les cuves de réacteurs nucléaires, les gaines de zircaloy, les aciers de carrosserie automobile, les alliages de l'aéronautique...

Une fois l'alliage métallique obtenu, viennent le *contrôle et la maîtrise des propriétés* en conditions d'usage. Certaines de ces propriétés sont dictées par la nature de l'environnement dans lequel le matériau est appelé à fonctionner :

1. chimie de la corrosion,
2. chimie de l'oxydation,
3. chimie de la catalyse.

Le comportement des matériaux est fortement dépendant de la distribution spatiale des atomes, que ce soit sous forme de ségrégations (de solidification ou aux joints de grains, suite à des traitements thermiques) ou sous forme de démixtion en plusieurs phases. Ces secteurs sont, de longue date, communs à la Métallurgie et à la chimie : l'électrochimie pour (1), la chimie des solides pour (2), et la réactivité en milieu liquide ou gazeux pour (3).

À la fin des années 1990, Usinor se trouvait confronté à une mystérieuse apparition de phosphures mixtes (Fe,Ti)P dans certaines bobines de tôles laminées pour carrosserie automobile. Cette précipitation se produisait au cours du refroidissement lent des bobines sur leur aire de stockage. Les codes de cinétique de précipitation (calculs des courbes TTT (temps-température-transformations)) excluaient la possibilité d'une telle précipitation. Un des paramètres clés de ces calculs est l'enthalpie de formation du composé. À la demande de la Direction scientifique d'Usinor, cette enthalpie fut calculée *ab initio* au CEA-Saclay.

Pour estimer l'enthalpie de formation du phosphure mixte (Fe, Ti)P, le code industriel faisait la moyenne arithmétique des enthalpies de formation des deux phosphures simples, FeP et TiP. Le calcul de structure électronique montra que, Ti et Fe étant des éléments respectivement en début et en fin de bande d , la cohésion des phosphures mixtes passe par un maximum lorsque le rapport Ti/Fe varie entre 0 et 1, fait essentiel que gommait l'interpolation linéaire du code industriel. Une interpolation parabolique fut introduite avec succès dans le code industriel. C'est donc un calcul de structure électronique qui permit de corriger le code industriel.

En matière de *corrosion*, les études les plus avancées indiquent que la nature des transferts électroniques aux interfaces joue un rôle central, et apparaît aujourd'hui la possibilité de corrélérer la microstructure (en termes de ségrégations

chimiques ou de composition locale des phases présentes) aux cinétiques de transformation. L'importance pratique de la résistance à l'oxydation, que ce soit à haute ou à plus basse température, a largement contribué au développement des travaux sur les réactions en phase solide contrôlées par les cinétiques de diffusion. Les structurations spatiales observées ont donné lieu à des interprétations inspirées des travaux portant sur les instabilités dans des systèmes couplés.

La lutte contre l'oxydation, parallèlement au développement des barrières thermiques, a conduit à mettre au point des systèmes multicouches complexes qui, eux aussi, nécessitent une compréhension approfondie de la physicochimie des solides constitutifs et de leurs interactions mutuelles.

La catalyse relève du domaine de la chimie des réactions et des structures électroniques des surfaces et des agrégats. Il s'agit d'un domaine à caractère très fondamental et, là encore, le couplage de la chimie et de la métallurgie est fort, en particulier en ce qui concerne l'élaboration des matériaux métalliques dispersés à fonction catalytique.

Enfin les relations entre la chimie et la Métallurgie apparaissent aussi de façon centrale dans le *développement de matériaux nouveaux*. Que ce soit par des techniques relevant de la chimie combinatoire ou par des approches plus théoriques, qui mettent à profit les relations existant entre les structures électroniques et les diagrammes de phase, la richesse et la créativité de la chimie métallurgique est ainsi illustrée par le développement des verres métalliques massifs, des quasi-cristaux* et plus généralement des alliages intermétalliques complexes, des alliages à dispersoïdes... On retrouve ainsi chimie et Métallurgie côte à côte dans les questions relatives au stockage de l'hydrogène, au développement de matériaux magnétiques, supraconducteurs, thermoélectriques ou magnétocaloriques, et dans presque tous les développements de matériaux liés à la production, au transport, au stockage ou à l'utilisation optimale de l'énergie.

Ce long compagnonnage entre la chimie et la Métallurgie est actuellement en pleine évolution. Les nouvelles exigences dans l'élaboration et le recyclage des matériaux métalliques révolutionnent la métallurgie extractive. Elles appellent un effort soutenu en termes :

- d'une maîtrise de plus en plus stricte des compositions des alliages utilisés ainsi que de leurs microstructures (cf. § 2). Ce qui était naguère curiosité de laboratoire (métaux ultrapurs, monocristaux à orientation prédécidée...) est devenu, ici ou là, nécessité industrielle ;
- du cycle de vie de l'alliage, son éventuel recyclage devant orienter les choix initiaux et posant des problèmes où la chimie joue le rôle central ;

- de la course aux performances – économies d'énergie, allègement des structures... – qui réduit le tonnage des alliages traditionnels au profit d'alliages structurellement et chimiquement plus complexes (nouveaux aciers, alliages de titane, de zirconium..., avec des additions naguère inusitées, lithium, terres rares...), tous alliages dont le chimiste doit déterminer les propriétés principales, notamment thermodynamiques, ainsi que les chemins réactionnels permettant les mises en solution ;
- de la prise en compte des sollicitations extrêmes, s'agissant notamment des diverses corrosions (sous contrainte, sous irradiation...), en lien fort avec les acquis de la Métallurgie physique (présence et évolution des défauts, etc.).

Aux côtés de la chimie, comme de la physique, la thermodynamique – équilibres et cinétiques – est au cœur de la Métallurgie. Ses lois régissent élaborations et transformations. En raison du grand nombre de constituants possibles, le nombre d'équations d'équilibre peut dépasser la dizaine, ce qui exige de gros moyens de calcul ; à quoi s'ajoute la complexité physique des systèmes : mélanges de gaz, de liquides et de solides, problèmes de surfaces et d'interfaces...

4.2 De la thermodynamique et des diagrammes de phase...

Pas d'alliages sans diagrammes de phase : immense domaine du fait des nouvelles compositions et du très grand nombre des composants, trop rarement exprimés en termes d'activité thermodynamique.

Lieu de rencontre privilégié entre chimie, physique statistique et physique des solides, la Métallurgie part d'une meilleure compréhension des interactions interatomiques pour prédire avec une bonne précision nombre de diagrammes de phase binaires et ternaires, à partir d'un petit nombre de paramètres expérimentaux issus de mesures effectuées sur un petit nombre de compositions.

- Mais si les moyens de calcul récents ont permis de créer des logiciels puissants pour évaluer les données thermodynamiques et calculer les diagrammes de phase, les applications en sont souvent limitées par manque de données expérimentales (connaissance des phases stables et métastables, données thermodynamiques correspondantes...). Faute de données de calorimétrie à haute température, les codes de calcul se livrent à des interpolations linéaires pas toujours justifiées. Les travaux expérimentaux dans ce domaine sont de plus en plus rares, situation à laquelle il importe de remédier.

La physique statistique, autre approche indispensable, permet la description de l'*ordre*, c'est-à-dire de l'arrangement local des atomes, auquel s'ajoute celui des défauts*, lacunes*, interstitiels*...

Ces études sont particulièrement importantes pour les *composés intermétalliques*, qui sont à la base de nouveaux alliages et pour les *alliages amorphes* ou vitreux, encore mal compris.

4.3 ... aux évolutions structurales

La thermodynamique chimique couplée avec les phénomènes de transport permet de mieux comprendre et de maîtriser la genèse des microstructures. L'obtention de matériaux très divisés ou à géométrie confinée conduit à revisiter des composés et des structures différentes de celles connues à l'état massif, susceptibles d'induire des propriétés physiques ou chimiques originales, comme la résistance à l'oxydation. Enfin les interactions avec l'environnement sont en passe d'être beaucoup mieux comprises, grâce à la prise en compte des couplages entre sollicitations. Ainsi, dans le cas de la *corrosion sous contrainte*, c'est la chimie et la mécanique qui sont mobilisées sur des questions métallurgiques : formation de couches d'oxyde contraintes, fracturation de couches passives sous l'effet de la plasticité du solide sous-jacent... qui ouvriront l'accès dans le futur à l'auto-guérison des défauts. Par ailleurs, il est acquis que les progrès dans les assemblages, qu'ils soient obtenus selon des procédés réputés classiques comme le soudage, ou par des techniques plus avancées comme le collage, ne pourront conduire aux progrès attendus dans l'allègement des structures que grâce à une compréhension fine des phénomènes d'interface ou d'interphases, à l'échelle de la liaison chimique comme à celle de l'évolution microstructurale de la zone affectée par le procédé.

Ces évolutions dans l'état des connaissances vont de pair avec les développements des outils expérimentaux : méthodes de champs proches, microélectrochimie, sonde atomique, grands instruments, qui permettent de sonder la matière et déterminer la nature chimique locale des constituants élémentaires jusqu'à l'échelle atomique. Il est primordial que l'effort instrumental correspondant, où notre pays s'est distingué, soit développé de manière très déterminée.

Il reste que la solidification, les transformations à l'état solide, la dégradation chimique (corrosion...) sont des processus que la thermodynamique est impuissante à prédire, en termes de vitesse de transformation, de chemin suivi, d'échelle des longueurs et de morphologie des produits. Il est courant de faire appel à quelques principes heuristiques de justification souvent douteuse. La physique statistique en permet au moins la modélisation en termes de saut d'un

atome d'un site à un site voisin en passant par une position de « col », description encore problématique.

Cette approche est généralisable, bon nombre de transitions pouvant se décrire par un passage de col dans un espace des phases adéquat. La description classique des transformations structurales (germination et croissance) a permis le développement de logiciels, qui « prolongent », en quelque sorte, les logiciels cités plus haut pour les diagrammes de phase. Ici encore le manque de données expérimentales constitue un obstacle grave.

- Face aux défis ainsi lancés à la chimie du métal, il est indispensable que renaissent en France des équipes expertes – ou que soient renforcées celles qui subsistent. Elles s'appliqueront aux mesures fines, et à l'analyse, des données de structure (cristallographique, thermodynamique...) des nouveaux alliages. La simple collecte de ces données à partir d'appareils automatiques est en effet très insuffisante si l'on veut non seulement savoir, mais comprendre, en vue d'ouvrir des voies nouvelles.
- Une importance accrue sera donnée aux études de corrosion, ainsi qu'à la réduction des diverses pollutions que l'industrie métallurgique provoque.
- La relance souhaitée de la chimie du métal se fera en coordination forte avec celle de la Métallurgie physique, condition qui n'a pas toujours été – de part et d'autre – respectée dans le passé.

5 | Métallurgie, physique statistique et numérique

Comme on l'a signalé dans les paragraphes précédents, la Métallurgie moderne s'efforce d'expliquer le comportement macroscopique des métaux à partir des processus à l'œuvre à l'échelle atomique. Il est donc tout naturel que les échanges avec la physique statistique soient nombreux et fructueux.

La description des transformations structurales, par exemple, repose sur diverses approches statistiques : simulation Monte Carlo cinétique sur réseau rigide, ou mou (relaxations élastiques locales) ; méthode des champs de phase ; dynamique d'amas ; champ moyen cinétique (sur la base des équations d'Onsager)..., puis passage de cette échelle de description à des échelles supérieures, méso- et macroscopiques (approches multi-échelles).

La méthode des champs de phase, fondée sur des modèles continus d'énergie libre, est bien adaptée à ces études : les degrés de liberté γ sont définis par une moyenne locale (champs de concentration, paramètres d'ordre, densité de dislocations...) décrivant l'évolution interactive de ces degrés de liberté

sur une échelle qui va du nanomètre au micromètre. Elle n'est cependant pas encore complètement prédictive, alimentée qu'elle est par des données souvent mal déterminées.

- Il est donc nécessaire de mettre en œuvre un programme ambitieux de mesures des données thermo-chimiques, des coefficients de diffusion et des mobilités dans des alliages modèles, et de se donner les moyens d'élaboration de ces alliages (annexe 3).

D'autres domaines de la Métallurgie bénéficient d'un dialogue fructueux avec la physique statistique : instabilités de la déformation plastique de type Portevin-Le Chatelier, propagation d'une dislocation dans une solution solide, mouvements de parois diverses, autant de domaines de fertilisation croisée entre les deux disciplines.

Enfin, diverses techniques de physique statistique numérique sont utilisées en Métallurgie pour évaluer des grandeurs mises en jeu dans les théories macroscopiques (énergies libres d'interfaces, barrières d'activation thermique de divers processus...).

Ces approches reposent souvent, mais pas exclusivement, sur la simulation numérique des différents phénomènes, à partir d'une compréhension fine des mécanismes de base. Cette démarche est commune à beaucoup de disciplines.

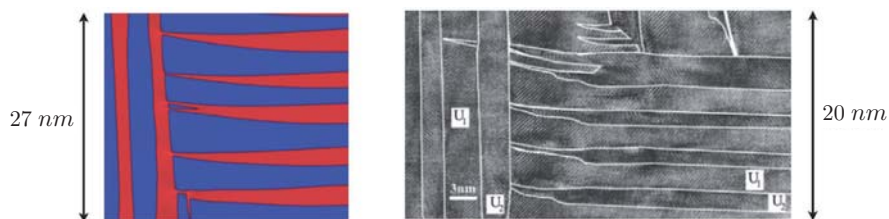


Figure 1.2

Structure multi-lamellaire d'une martensite dans l'alliage à mémoire de forme Ni-35 %Al : comparaison entre une simulation par la méthode des champs de phase (à gauche) et une observation en microscopie électronique à transmission (à droite). La martensite se présente sous la forme de deux variants alternés (couleurs différentes sur la simulation, notations U_1 et U_2 sur l'observation expérimentale) séparés par des plans de type (110). La modélisation reproduit fidèlement, le long de la macro-macle, les effets de rétrécissement, rotation et division des variants, phénomènes à l'origine de la stabilité de la microstructure (Thèse U. Salman, Onera, 2009).

Au-delà des utilisations usuelles du numérique (calcul et archivage des grandeurs thermodynamiques et cinétiques, résolution des équations de modèles phénoménologiques divers, etc.), la Métallurgie a vu naître une science nouvelle, celle des *métaux virtuels*. La puissance actuelle des ordinateurs permet en effet de simuler la dynamique de la microstructure d'un métal (bien plus que celle de quelques atomes) sous sollicitations diverses, et d'en prédire le comportement.

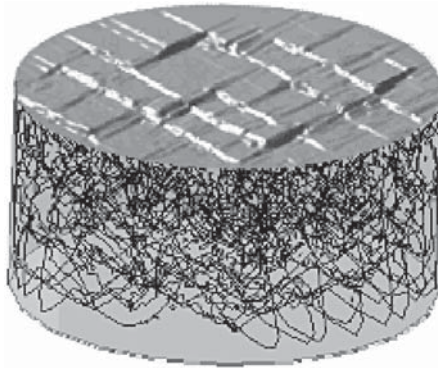


Figure 1.3

Simulation de la structure des dislocations sous sollicitation cyclique d'un alliage cubique à faces centrées (Acier 316L). La normale à la surface libre est [221]. La microstructure et le relief associé sont obtenus pour un chargement de fatigue en glissement double symétrique sur les systèmes [110][1-11] et [110][1-11] pour une amplitude de déformation plastique imposée symétrique de $\Delta\varepsilon = 10^{-3}$. (Thèse C. Depres, Grenoble INP).

On sait tout d'abord déterminer, à partir de calculs de structure électronique *ab initio*, des modèles de forces interatomiques, ainsi que les données principales relatives aux défauts (structure atomique, énergies de formation et de migration *cf.* § 2.). De là, par des calculs de dynamique moléculaire hérités de la physique statistique, et à partir du mouvement prolongé d'un grand nombre d'atomes (centaines de milliers de vibrations de millions d'atomes) ? on simule l'effet de taille des solutés, le durcissement qui leur est dû, le cisaillement des précipités, la création de défauts d'irradiation, etc. À des échelles dimensionnelles supérieures, on sait simuler le mouvement d'éléments complexes de la microstructure – soit naturel (migration des défauts), soit sous l'effet de forces estimées de manière plus empirique – et les conséquences pratiques de ce mouvement : vieillissement d'alliages, recristallisation, dynamique collective des dislocations dans une population de points d'ancrage et conséquences sur la plasticité, propagation de fissures...

Certains des « paramètres d'entrée » étant ainsi calculés, d'autres étant issus de mesures expérimentales – approximativement dans les deux cas – on crée alors des *métaux virtuels* dont on peut calculer, à diverses échelles de taille, le comportement, notamment au cours du temps. C'est ainsi que l'on étudie le durcissement d'érouissage* ; la modélisation des évolutions de croissance de grains, de la recristallisation et de la texture des joints de grains ; la déformation d'agrégats polycristallins, se reliant avec l'anisotropie cristalline et la texture (*cf.* par exemple la déformation d'aciers bainitiques) et jetant un pont avec la mécanique des solides ; les cinétiques d'évolutions lentes comme celle de la décomposition des « superalliages » de l'aéronautique ; le vieillissement des

alliages sous irradiation ; la solidification après coulée (cf. § 6.3), avec prédiction de certaines structures granulaires et des ségrégations chimiques du lingot...

Certes, on est encore loin de modéliser un alliage multiconstituant industriel ou les déformations correspondant à sa mise en forme, mais la Métallurgie numérique a largement dépassé son cadre initial qui était de reproduire des faits connus : outil de recherche à part entière (tout comme la Métallurgie expérimentale ou théorique), elle aborde aussi désormais la *prédiction*, à moyen et long termes. La durée de fonctionnement d'un objet industriel (une aile d'avion, une cuve de réacteur nucléaire...) étant devenue, au-delà de la mise au point de ces objets, une donnée économique primordiale, on mesure l'importance de ces développements.

Aussi recommandons-nous :

- que la France soit dotée des moyens de calcul les plus performants, facilement accessibles ;
- que les communautés de Métallurgie et de Science des matériaux y aient accès, en tenant compte de leurs spécificités, notamment d'un équilibre entre très grosses simulations et très nombreux calculs d'ampleur modeste fournissant les données d'entrée pour des calculs d'échelles macroscopiques ;
- que la Métallurgie numérique se développe en relation étroite avec l'expérimentation et qu'elle essaime à partir des équipes actuellement impliquées ;
- que le numérique entre dans l'enseignement de la Métallurgie et dans la formation des chercheurs et des ingénieurs ;
- que, si un enseignement de la physique numérique devait se développer, la Métallurgie soit présente dans cet enseignement.

6 | Métallurgie et élaboration

La maîtrise de l'élaboration, déjà soulignée au paragraphe 4, vise à assurer la qualité des produits métallurgiques (respect des normes de compositions, pureté, santé interne, faible dispersion des propriétés des produits). Au-delà de cet objectif immédiat, les progrès scientifiques et techniques dans les domaines de l'élaboration et du recyclage des métaux et produits métallurgiques sont cruciaux pour la durabilité des filières industrielles vis-à-vis des enjeux environnementaux et de la compétitivité technique et économique des sites de production,

notamment en France (productivité et efficacité énergétique des procédés, réduction des déchets solides ultimes, effluents liquides et émissions gazeuses).

En Métallurgie, les activités d'élaboration peuvent être globalement classées en trois grands domaines :

- les filières sidérurgiques (filrière classique haut-fourneau, filière four électrique) ;
- les filières d'élaboration des métaux non ferreux de grande diffusion (exemple : aluminium) ;
- les Métallurgies spéciales ou avancées concernant des métaux et alliages à très haute valeur ajoutée (aciers spéciaux à hautes caractéristiques et très alliés, titane, zirconium, superalliages,...).

L'ensemble de ces domaines est actuellement confronté aux enjeux suivants :

- la variabilité du prix et de la qualité des matières premières, ainsi que la nécessité de prendre en compte les possibilités du recyclage (tout particulièrement vrai pour les domaines 1 et 2 ci-dessus) ;
- la nécessité d'une parfaite maîtrise de la qualité des produits (composition, inclusions, défauts...) en particulier pour les applications les plus critiques (aéronautique, énergie, emballage rigide, et domaine 3) ;
- la réduction de l'émission des gaz à effet de serre et en particulier du CO₂, nécessitant souvent une modification ou une remise en cause profonde des filières de production (voir en particulier l'effort de la sidérurgie en ce sens – cf. annexe 4) ;
- la nécessité de réaliser des économies d'énergie pour satisfaire le point précédent, mais aussi compte tenu du coût croissant des énergies (pour tous les domaines, mais moins critique pour 3).

6.1 Les procédés du futur

Il y a un réel enjeu, sociétal et scientifique, à maîtriser les rejets des procédés de transformation de la matière. Les hautes températures pratiquées par la pyrométallurgie favorisent par nature l'émission de nombreux composés volatils et de CO₂. L'hydrométallurgie, utilisatrice de solutions concentrées, engendre des

effluents liquides et des boues, qui doivent être traités. Dans le cas de l'élaboration de l'aluminium par électrolyse, des émissions de PFC¹² à haut pouvoir d'effet de serre sont associées aux émissions de fluorure et CO₂.

Pour espérer maîtriser les rejets des procédés à haute température, il est nécessaire d'entreprendre des recherches couplant compréhension des mécanismes physicochimiques d'émission et de transformation des polluants et modélisation globale des procédés. On pourra alors espérer prédire les émissions en fonction des conditions opératoires et proposer des solutions pour supprimer ou maîtriser les rejets, soit par modification des procédés existants, soit par la conception de nouveaux procédés, voire le développement de nouvelles filières, comme c'est le cas actuellement dans le domaine de la sidérurgie (cf. annexe 4).

- Pour prédire les impacts environnementaux d'une filière d'élaboration complète, il faut inventer de nouvelles approches, plus pragmatiques et vraisemblablement hybrides associant approche systémique et approche mécanistique. Parmi les apports récents, l'analyse de cycle de vie (ACV), conçue par les environnementalistes, est un puissant outil de quantification des impacts environnementaux. Pour qu'il fournisse son potentiel, il convient cependant de l'améliorer (respect des bilans matières et énergie, transparence des calculs des facteurs d'impact), de l'étendre (passage du produit au procédé et à la filière) et de l'enrichir (analyse énergétique, analyse dynamique).
- Sur le moyen terme, nous suggérons d'engager de nouvelles recherches dans le cadre d'un programme pluridisciplinaire national incluant la réduction des émissions polluantes à la source, l'évaluation des impacts environnementaux, la prise en compte du recyclage des sous-produits, des actions relatives au CO₂ et aux économies d'énergie, ainsi que des études sur de nouveaux procédés (voir le détail dans l'annexe 4).
- En ce qui concerne les procédés électro-intensifs, tels que la production d'aluminium primaire par électrolyse de l'alumine en bain de sels fondus (cryolithe), il convient maintenant d'identifier et de développer des technologies de rupture à même de ramener les rejets du procédé (F, CO₂) à des valeurs proches de zéro ainsi que de réduire significativement la consommation d'énergie qui, par ailleurs, en raison de l'impact significatif du coût de l'énergie en France est l'élément clé de la pérennité de l'industrie de l'aluminium primaire dans notre pays.

¹²PFC : perfluorocarburés.

6.2 Maîtrise de la qualité des produits

La maîtrise parfaite de la composition de l'alliage, de sa pureté et de sa propreté inclusionnaire est conditionnée très tôt dans la filière d'élaboration, lors des étapes communément appelées d'affinage ou de traitement du métal liquide, avant la solidification. Ces opérations d'affinage doivent être optimisées avec le plus grand soin pour atteindre ces critères de qualité du métal liquide.

À titre d'exemple, on peut citer les alliages de zirconium destinés à l'industrie nucléaire qui exigent des fenêtres de composition visées extrêmement réduites.

Dans beaucoup d'alliages, les teneurs en impuretés et en éléments dissous (oxygène, azote, hydrogène) doivent être le plus souvent réduites, ou pour le moins maîtrisées, pour ne pas dégrader les propriétés spécifiques recherchées ; on peut citer l'exemple des aciers spéciaux utilisés en motorisation où des teneurs en azote inférieures à quelques dizaines de ppm ($\text{ppm} = 10^{-6}$) sont requises pour satisfaire les tenues en fatigue.

Dans les alliages d'aluminium pour l'aéronautique, la teneur en hydrogène limite pour l'apparition de porosités est de l'ordre du dixième de la ppm. La sensibilité du dégazage à l'humidité de l'atmosphère ambiante en fonderie, qui régit la teneur minimale en hydrogène du métal liquide, et à la composition du métal reste aujourd'hui un verrou scientifique et technique pour ces produits (notamment les alliages contenant du lithium).

L'état inclusionnaire correspond, suivant les métaux, soit à des inclusions de très faible occurrence, dites accidentelles, qui constituent des défauts inacceptables dans les conditions extrêmes d'utilisation, ou bien à des populations inclusionnaires définies en termes de composition, densité numérale et de taille. Pour la première catégorie, citons par exemple les défauts *hard-alpha* dans les alliages de titane qui doivent être totalement éliminés lors des procédés de fusion/refusion, et pour la deuxième catégorie, la taille limite tolérée dans les alliages d'aluminium, dans les aciers ou les superalliages qui est en constante diminution pour répondre aux attentes des utilisateurs de ces produits.

Une haute propreté inclusionnaire est cruciale pour permettre les opérations de mise en forme sévères telles que la fabrication de corps de boîtes boisson par étirage de bandes laminées et embouties, jusqu'à des épaisseurs finales de parois très minces (moins de $100 \mu\text{m}$), de pièces forgées et matricées vitales pour structures aéronautiques ou de fil mécanique ou électrique destiné au tréfilage. Dans le cas des alliages d'aluminium, la caractérisation de la qualité inclusionnaire intégralement en ligne et la prédiction de son effet sur la santé interne des

produits métallurgiques après mise en forme est un thème de progrès pour la recherche.

Le recyclage des matériaux métalliques est reconnu par tous comme une nécessité pour des raisons évidentes de limitation et de disparité des ressources minérales pour certains métaux et donc d'indépendance vis-à-vis des pays producteurs, mais aussi pour des questions environnementales afin de réduire les déchets ultimes produits par les activités humaines et réduire la consommation d'énergie inhérente à l'élaboration de métal primaire. Le recyclage a aussi un impact économique important. Certaines industries métallurgiques réalisent déjà une part importante de leur production à partir de MPS (matières premières secondaires) : c'est le cas en France de l'industrie de l'aluminium avec *plus de 50 %* de sa production, et de l'acier avec environ 40 %. Un laboratoire de référence en Europe, doté de moyens semi-lourds, est celui de l'Institut de génie métallurgique (RWTH/IME) d'Aix-la-Chapelle. Les laboratoires français ne sont pas équipés de moyens spécialisés appropriés à cette thématique.

Un des enjeux du recyclage consiste à rendre compatible la grande dispersion dans la composition des MPS avec les exigences toujours plus sévères sur la qualité du métal liquide.

- Cet objectif ne peut être atteint qu'à travers une optimisation des techniques d'affinage du métal liquide, ou en mettant en œuvre de nouvelles technologies.

Pour les métaux et les alliages à *très haute valeur ajoutée*, tels que le titane, le zirconium, les superalliages, les aciers très alliés..., les procédés de refusion (refusion à l'arc sous vide, refusion sous laitier électroconducteur, refusion par bombardement électronique) ont connu des développements importants. Dans ce domaine, le recours aux outils de modélisation mathématique et de simulation numérique, pour lesquels la France a une position forte, est primordial et a permis une bonne maîtrise des différents critères de qualité cités ci-dessus. L'effort en ce sens doit être poursuivi. À titre d'exemple, la Métallurgie du titane a développé la technique de fusion par bombardement d'électrons avec creuset d'affinage, pour élaborer en continu des alliages à partir de 100 % de MPS (voir les annexes 6, 16, 17 et 22).

Aussi, recommandons-nous que :

- la maîtrise des paramètres opératoires d'un procédé aussi complexe nécessitant tout particulièrement le recours aux outils de simulation numérique, ces outils soient développés ;

- pour certaines situations particulières, l'obtention d'une structure spécifique ou d'une forme complexe pouvant nécessiter des procédés basés sur la métallurgie des poudres, tels que le SPS (*spark plasma sintering/frittage flash*) ou d'autres méthodes de frittage, ces procédés soient plus largement étudiés et développés. Même si de tels procédés sont réservés à des usages très spécifiques et ne sont pas destinés à une expansion industrielle importante, ils doivent cependant faire l'objet d'une attention particulière ;
- par ailleurs, les procédés de soudage et de brasage, et de dépôts par des procédés au plasma ou au laser qui font intervenir l'état liquide, relevant des mêmes démarches que celles mises en œuvre pour les procédés d'élaboration, une plus forte implication des équipes de recherches, spécialisées en élaboration soit mise en place.

6.3 Maîtrise des procédés de coulée et de solidification

En aval des procédés d'élaboration à haute température et de traitement du métal liquide, les procédés de coulée et de solidification constituent d'autres étapes de fabrication cruciales pour la compétitivité des producteurs industriels de demi-produits métallurgiques destinés au corroyage (par laminage, forgeage, filage, etc.) ou de pièces de fonderie. En effet, leur maîtrise est déterminante du point de vue de l'efficacité économique des procédés (réduction des dispersions et rebuts de mise en œuvre (ou « mise au mille ») de métal et de la consommation d'énergie) et de la capacité de différenciation des producteurs.

Ces exigences vont de soi pour les pièces de fonderie (*cf.* chapitre 2 § 3.1). On citera la coulée en fonderie à la cire perdue de pièces d'aubes de turbines en superalliages à base nickel. La maîtrise de la qualité des pièces de fonderie en termes de distribution des défauts de retassures et de porosités de solidification a considérablement progressé depuis les années 1990 grâce à la recherche en modélisation multi-physique de la solidification (approches principalement thermiques et métallurgiques), avec des contributions majeures des équipes de Lausanne (EPFL¹³) et d'équipes françaises (Écoles des mines) au développement de logiciels « métier » commerciaux désormais accessibles aux services méthodes des grands groupes comme aux PMI/PME.

Elles concernent aussi la coulée et la solidification des demi-produits destinés au corroyage, dans la mesure où les étapes ultérieures de mise en forme des produits ne permettent généralement pas de « corriger » totalement des hétérogénéités dans la structure des produits héritées de l'étape de solidification

¹³EPFL : École polytechnique fédérale de Lausanne.

aux diverses échelles (ségrégations chimiques, veines sombres dans les aciers, « freckles » dans les superalliages, par exemple).

- Le contrôle de l'homogénéité des alliages nécessite une modélisation multi-physique (thermique, mécanique des fluides, et métallurgie de la solidification) et multi-échelles (modélisation granulaire) en relation étroite avec les paramètres de coulée et de constitution des alliages. La France dispose de compétences de premier plan, notamment à Nancy, donnant lieu à des collaborations au niveau européen, en particulier avec la Suisse (EPFL) et la Norvège.
- La maîtrise de la sensibilité à la crique (genèse de fissures) lors de la coulée semi-continue d'alliages d'aluminium à haute résistance mécanique spécifique en gros format pour structures aéronautiques est un thème de recherche important. La compréhension des mécanismes de genèse des défauts doit progresser aussi grâce à la caractérisation tridimensionnelle des structures de solidification avec les possibilités nouvelles de la tomographie X en rayonnement synchrotron (notamment en France, à l'ESRF¹⁴).

Ce paragraphe « Métallurgie et élaboration », qui s'achève ici, aurait pu aussi bien se trouver en début du chapitre 2 qu'en fin du chapitre 1 : preuve – s'il en était besoin – de l'imbrication de la Métallurgie-discipline-scientifique et de la Métallurgie-activité-industrielle.

Il aurait pu en aller de même pour le paragraphe 2 du chapitre suivant (« Mise en forme et mise en œuvre »). Lui aussi couvre un champ très général qui, comme celui de l'élaboration, fait appel à de nombreuses disciplines à la fois scientifiques et techniques, relevant en particulier du génie métallurgique (mécanique des solides et des fluides, thermique, tribologie, etc.). Celles d'entre elles qui – hors souci d'exhaustivité – y sont abordées ayant plutôt trait aux problèmes industriels, ce paragraphe trouve mieux sa place dans les débuts du chapitre 2.

Conclusion

À l'issue de ce chapitre, il est clair que la Métallurgie, à l'instar d'autres sciences de l'ingénieur, se trouve devant un défi passionnant aux retombées industrielles claires : comprendre l'élaboration et le comportement de la matière depuis l'atome et la structure, électronique et cristallographique, jusqu'aux grandes structures macroscopiques. Les nouveaux outils de caractérisation fine et, entre autres, les nouvelles méthodes de modélisation numérique rendent possible de jeter un pont du plus petit au plus grand mais aussi du plus fondamental

¹⁴ESRF : European Synchrotron Radiation Facility.

au plus appliqué. C'est là une direction majeure où doit porter l'effort. Elle a le double mérite d'être attirante pour de jeunes étudiants brillants et de permettre un transfert rapide et naturel vers les grands codes de calcul utilisés par les industriels. Elle permet également d'associer, dans une même approche pédagogique, la physique, la chimie et la mécanique.

Il va de soi que la modélisation doit s'appuyer sur une compréhension fine des mécanismes. C'est dans une articulation pertinente des trois composantes : compréhension des mécanismes à l'échelle atomique, possibilité d'acquérir les données nécessaires et simulation massive des différents phénomènes, qu'il nous faut maintenir le niveau des Métallurgies française et européenne, et notamment tenir tête aux très fortes équipes de Métallurgie plus classique en cours de constitution en Chine, en Inde ou au Brésil.

Maintenir ce niveau là où il est bon, et l'élever là où il n'est que moyen, présentent une justification en soi, c'est-à-dire pour la recherche. Il en est une autre aussi importante : celle de nourrir l'activité industrielle tout en bénéficiant d'elle. C'est celle-ci que nous abordons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2

La Métallurgie : une industrie en pleine mutation

Vj k'ŕ ci g'k'pvgpvk'pcm' 'igh'dncpm

La Métallurgie est présente dans notre quotidien de manière tellement banalisée que l'on ne s'émerveille pas des prouesses – en termes de maîtrise des matériaux – que recèlent une simple boîte boisson qui allie l'extrême commodité d'emploi avec l'hygiène, un ordinateur portable et ses circuits électriques de taille submicronique qu'on utilise sans panne matérielle durant 5 années au moins, ou une centrale nucléaire qui fonctionne plus de 50 ans avec ses kilomètres de tuyauterie et ses gaines de combustible en alliages « exotiques » inventés il y a un demi-siècle.

Ces derniers, sous le nom initial de *zircalloys*, sont le produit de longues études où se sont mêlées la chimie du zirconium, la thermodynamique des alliages de ce métal, la physique des défauts cristallins, car l'irradiation par les neutrons du réacteur tend à déformer – par un phénomène appelé *croissance* – ce métal de structure hexagonale, ainsi bien sûr que la physique des réactions nucléaires : bel exemple de multidisciplinarité.

Des tours de force qui sont à l'origine de ces différents objets, il n'en est pas un, désormais, qui ne soit sous-tendu, ou contrôlé, ou expliqué par de la physique, de la mécanique ou de la chimie telles qu'évoquées au chapitre précédent. Et il n'en est plus un qui soit, inversement, mis au point par simple empirisme. C'est dire que notre industrie métallurgique est désormais en prise directe avec le développement des sciences, celles-ci bénéficiant en retour des problèmes posés par celle-là, les deux participant ainsi à plein à la marche de notre économie. Une longue tradition de bonnes relations entre les mondes industriel et universitaire demeure encore vivante.

Cette liaison entre la Métallurgie industrielle et la science revêt de nombreux aspects qui se traduisent par une longue expérience des partenariats et des collaborations avec les différents acteurs de son « écosystème » :

- en amont, les fournisseurs (matières premières, énergie, équipements, etc.),
- en aval, les clients,
- en parallèle, la recherche publique qui vient d'être évoquée,
- la concurrence (on peut citer à titre d'exemples le cas de Usinor qui a œuvré avec plus de 20 entreprises sidérurgiques mondiales dans le cadre des projets ULSAB, ULSAS, ULSAC et ULCOS¹ (annexe 4) et de Pechiney

¹ULSAB : Ultra Light Steel Auto Body (www.autosteel.org) ; ULSAC : Ultra Light Steel Auto Closures (www.autosteel.org) ; ULSAS : Ultra light Auto Suspensions (www.autosteel.org) ; ULCOS : Ultra Low Carbon Dioxide Steelmaking (www.ulcos.org).

avec Nippon Steel et Thyssen en vue d'améliorer ses connaissances sur les phénomènes de précipitation à l'état solide et développer de nouveaux produits),

- nombre d'autres entreprises (les « pairs » en vue de développer des solutions globales (par exemple association de divers matériaux comme l'acier, le verre, le plâtre, le béton, etc.).

Cette méthode de « travailler ensemble pour être plus performants » est profondément ancrée dans la stratégie de la majorité des entreprises. Elle permet de développer les innovations dans tous les domaines (commercial, marketing, finances, ressources humaines, etc.).

Par ses innovations et son dynamisme, cette industrie possède encore des atouts majeurs, en termes de recherche (annexes 1 et 24), de qualité technique des équipes, de rationalité des installations, mais aussi d'agressivité commerciale et de reconnaissance internationale. On a cependant bien vu, ces dernières années, au cours d'OPA retentissantes – acier, aluminium ou cuivre – que les centres de décision s'éloignent de l'Hexagone, voire de l'Europe (cf. Introduction).

Ceci peut expliquer, pour partie, le relatif désintérêt des jeunes générations pour ce champ d'activité, avec un diagnostic comparable dans d'autres domaines des sciences de l'ingénieur, souvent désertés au profit du commerce ou de la finance. La situation est d'autant plus préoccupante que les décennies à venir vont – saine écologie oblige – requérir des matériaux, notamment métalliques, de plus en plus raffinés quant aux propriétés mécaniques, à la résistance aux corrosions, à la capacité de recyclage, au coût en énergie...

Cette mutation d'une activité industrielle à une tout autre, ici financière, est illustrée d'exemplaire façon par l'histoire récente de la Société de Wendel. Issue des Forges de Hayange, créées au début du XVIII^e siècle, la Société de Wendel, fameuse par ses aciéries de Lorraine et du Creusot, s'est dégagée en grande partie de la Métallurgie et s'est transformée en « Wendel Investissement » : mutation certes légitime, mais en même temps symbolique d'un renoncement (en termes d'intérêt et de contrôle) quant à des fabrications essentielles pour l'économie et l'indépendance du pays.

Dans ce chapitre, nous ouvrons le large éventail des domaines où la Métallurgie joue un rôle central et montrons en quoi les orientations de recherche présentées au chapitre précédent sont vitales si l'on veut conserver par devers soi les atouts d'un *leadership* technologique (voir MPS, chapitre 1 § 6.2).

Les divers cas traités ont été regroupés par grands domaines d'activités sans considération des importances socio-économiques relatives.

1 | L'industrie métallurgique en France

Décrite en détail dans l'annexe 1, l'industrie métallurgique au sens large (industries des biens intermédiaires, des biens d'équipement et des biens de consommation : celles relevant de l'UIMM) compte en France environ 45 000 entreprises, et représente 1 800 000 salariés, dont 21 % de cadres en 2007, et 420 milliards d'euros de CA (source UIMM²). Elle est donc d'importance stratégique pour l'économie et l'emploi.

1.1 Métallurgie et transformation des métaux

Ce secteur comprend la production, la première transformation et la fonderie ainsi que le travail des métaux. Il comporte 500 000 salariés. On trouve là de grands groupes (désormais principalement internationaux) en sidérurgie, fabrication de tubes, ferro-alliages métaux non-ferreux (principalement l'aluminium), et de nombreuses PMI/PME notamment pour la fonderie. Par ailleurs, la transformation des métaux regroupe plusieurs centaines d'entreprises travaillant sur le laminage, la fabrication de menuiseries métalliques, les fils et câbles, la chaudronnerie...

1.2 Applications des produits métalliques

C'est là le domaine des industries de conception, d'intégration et de fabrication de produits associant métaux et autres matériaux (assemblage, formage, traitements et revêtements de surface...) pour des clients et utilisateurs de l'aval. Les marchés principaux concernent les machines et équipements mécaniques, la construction automobile, l'aéronautique, la construction navale, le ferroviaire, le bâtiment, la défense... L'intégration avec d'autres métiers y est trop poussée pour que l'on puisse y isoler la Métallurgie *stricto sensu* (bien qu'elle joue là un rôle essentiel) en matière de statistiques précises.

²UIMM : Union des industries et des métiers de la métallurgie.

1.3 Restructurations et concentrations

Les secteurs de la sidérurgie et celui des métaux non ferreux ont vu leur paysage économique et industriel ainsi que leurs actionnariats et leurs centres de décision profondément modifiés depuis 35 ans. On assiste ainsi à la création de véritables groupes internationaux et à une prise de contrôle des industries métallurgiques françaises par des sociétés étrangères. Les fusions-acquisitions, amorcées après le choc pétrolier de 1973, se sont amplifiées depuis 2003, concernant non seulement les ex-groupes Arcélor et Pechiney mais aussi les secteurs du cuivre, du titane, du zirconium, du plomb, du silicium, la fonderie des superalliages, la métallurgie des poudres, les feuilles minces..., « externalisation » qui se traduit par une importante perte de compétences.

Une autre tendance forte est celle de la spécialisation des outils sur des marchés clés, notamment dans l'aéronautique, l'automobile, les pipe-lines... L'internationalisation du management va de pair avec, à l'embauche des ingénieurs et cadres, une recherche de profils multiculturels de plus en plus marquée.

1.4 Positions industrielles et technologiques en France

L'annexe 1 fournit une carte d'identité détaillée des métiers et des entreprises du secteur Métallurgie ainsi que de l'ensemble des restructurations récentes, tandis que l'annexe 24 fait état de la recherche industrielle en France. On y identifie un certain nombre de domaines où la position française reste forte, mais en même temps la très massive perte des centres de décision évoquée à l'instant et la situation incertaine de nombreuses PME/PMI (par exemple dans l'industrie automobile) frappées par la crise et par l'externalisation des activités de mise en œuvre des métaux de la part des grands constructeurs.

1.5 Impacts dans d'autres domaines

L'industrie métallurgique induit de nombreuses activités annexes, productrices d'emplois en conception ou en production ou, de façon plus générale dans tous les secteurs de l'ingénierie. À titre d'exemple, on évoque, dans l'encadré ci-dessous le cas des réfractaires, sachant que le même exercice pourrait être fait dans bon nombre de domaines.

Par exemple, de nouveaux matériaux à base d'alumine et de sialon permettent d'augmenter de façon importante la durée de vie des creusets des hauts-fourneaux en ménageant l'usure de la couche de carbone habituellement utilisée dans cette zone.

Ainsi les réfractaires constituent un maillon essentiel de la production des matériaux métalliques, de l'élaboration à la mise en forme : revêtement des hauts-fourneaux et des cellules d'électrolyse d'aluminium, filtres à métal liquide des fonderies... Les progrès de la Métallurgie, tant en nature et qualité des alliages qu'en coûts (durée de vie des fours), requièrent des améliorations ou modifications de ces matériaux. En outre, ils jouent un rôle clé dans les économies d'énergie grâce à leurs propriétés (tenue thermo-chimique, propriétés d'isolation thermique), soit dans de nouveaux procédés plus économiques souvent plus sévères, soit dans des fours existants.

2 | Mise en forme et mise en œuvre

Entre matériau brut et produit fini s'insèrent, dans de nombreux cas, la *mise en forme*, donnant aux pièces leur géométrie et leurs propriétés d'emploi, puis la *mise en œuvre*, assemblant les composants de la structure visée et leur appliquant éventuellement des traitements de finition : maillons essentiels de la chaîne industrielle et, pour la Métallurgie, champs permanents d'innovation. Les premiers procédés de transformation des métaux (moulage à partir de l'état liquide) sont nés avec la Métallurgie ; ils se sont ensuite constamment développés, avec une accélération considérable au cours de la dernière guerre et depuis, pour assurer la production en grande série de pièces à faible coût. Avec la fonderie, qui s'est diversifiée en de nombreuses techniques de moulage, sont apparus très tôt les premiers procédés de formage (forgeage libre à chaud de pièces massives brutes de coulée, formage à froid de feuilles métalliques).

Le début de notre ère voit l'essor des procédés d'étirage de fils et d'usinage de pièces, la Renaissance celui du laminage, devenu le plus courant procédé de mise en forme par déformation, et de la gravure à l'eau forte, prélude de l'usinage chimique. Avec la fonderie, qui s'est diversifiée en de nombreuses techniques de moulage, sont apparus très tôt les premiers procédés de formage (forgeage libre à chaud de pièces massives brutes de coulée, formage à froid de feuilles métalliques). Au milieu du siècle dernier se développent la forge à froid (1940) et le filage à chaud des aciers (par lubrification au verre, 1945), puis l'usinage par commande numérique (1960) et la coulée continue de l'acier (1970) (Felder, 2000).

Les procédés de mise en forme des métaux sont aujourd'hui d'une extrême variété. En laissant de côté ceux qui relèvent de la fonderie ou de la métallurgie des poudres, ainsi que l'usinage, l'accent est mis ici sur ceux (forgeage, laminage,

filage, emboutissage et leurs variantes) qui reposent sur la capacité des matériaux métalliques à supporter, à froid comme à chaud ou « à tiède », de grandes déformations irréversibles, plastiques, sans endommagement ni rupture. Ils incluent, de manière séquentielle ou simultanée, les traitements thermiques associés : une opération de mise en forme est aujourd'hui un ensemble intégré de traitements thermomécaniques et métallurgiques optimisés. Les méthodes numériques appliquées à la modélisation thermomécanique des procédés s'y sont déjà imposées comme condition clé des progrès. D'abord utilisées comme auxiliaires de l'ingénieur pour la résolution de problèmes pratiques, elles tendent aujourd'hui à devenir aussi un outil essentiel de compréhension et de représentation physiques, guidant le développement d'alliages ou l'optimisation de procédés.

Désormais, on ne vise plus seulement une forme mais simultanément une microstructure finale déterminée, garante des propriétés souhaitées (*Advances in material forming : Esaform 10 years on*, 2007). Ce fut d'abord le cas des *textures cristallographiques**, issues de la modification des orientations cristallines du métal polycristallin due aux fortes déformations plastiques de la mise en forme ; ces textures sont responsables d'une anisotropie des propriétés d'usage de la pièce formée dont il est possible de tirer parti en vue de l'utilisation visée.

C'est de plus en plus aussi le cas du contrôle de la taille des grains (par exemple pour l'obtention de grains ultrafins), de la distribution des joints de grains (on parle d'une « ingénierie des joints de grains », *grain boundary engineering*), des désorientations entre grains, de leur forme, de leur répartition spatiale. S'y ajoutent les préoccupations – liées à l'utilisation croissante de matières recyclées (voir MPS, chapitre 1 § 6.2) – de contrôle de la variabilité des microstructures résultantes et de leur influence sur celle des propriétés finales induites. La mise en forme ainsi conçue comme une « mise en structure » (*microstructure design*) demande une optimisation poussée des gammes thermomécaniques : souvent étagées (« laminage contrôlé » des aciers de construction, forgeage d'éléments de turbine en alliages à base nickel ou titane...), elles vont jusqu'à intégrer des chauffages localisés, pour l'obtention directe de pièces à gradients de propriétés.

Ces préoccupations se prolongent aux échelles plus fines en vue de maîtriser les phénomènes de recristallisation, de transformation de phase et de précipitation en cours de formage : fluage-revenu* (*creep forming*) pour les alliages à durcissement structural, utilisation optimale des changements de phase en cours de gamme (aciers « trempants », alliages de zirconium pour le nucléaire...), introduction d'éléments d'addition pour un contrôle à l'échelle nanoscopique, etc.

Cette évolution majeure de la Métallurgie l'amène à investir pleinement le champ de la mise en forme. Pour dépasser le stade initial de l'empirisme, il reste

à relever des défis scientifiques et techniques redoutables. L'enjeu est de développer des approches résolument pluridisciplinaires, mobilisant les sciences de la matière à leur meilleur niveau, pour construire des outils adaptés de modélisation d'une réalité multi-échelles, grandement complexe du fait du fort couplage entre les échelles pertinentes, très différentes, impliquées. Il s'y ajoute la nécessaire composante probabiliste de telles approches, liée au caractère dispersé des données de départ, à toutes les échelles, ceci le plus souvent dans un cadre de sollicitations à grandes vitesses et de cycles thermiques rapides. L'objectif final implique la mise au point d'un chaînage de modèles opérant une succession de changements d'échelles, chacun s'appuyant sur une version allégée, partiellement phénoménologique, du modèle qui le précède dans le passage au macroscopique. Ainsi la thermomécanique des simulations numériques à grande échelle – tenant compte du frottement métal-outil et de la lubrification et visant à prévoir les contraintes résiduelles ou le retour élastique – pourra alors faire sa jonction avec la micromécanique des agrégats et des métaux multiphasés et la plasticité cristalline comme avec la Métallurgie physique de la plasticité, des transformations de phases et de la précipitation sous contraintes.

La fabrication d'une voiture automobile fait largement appel à l'utilisation de tôles d'acier prédécoupées puis mises en forme par emboutissage et assemblées par soudage par points. La découpe, à l'aide de cisailles, peut laisser sur les rives des tôles une petite (0,1 mm environ) zone endommagée qui peut provoquer l'apparition de fissures lors de l'emboutissage ou encore réduire la résistance à la fatigue des assemblages. Les aciers à haute résistance introduits progressivement dans les véhicules les plus récents afin d'améliorer leurs performances lors d'un crash sont particulièrement affectés par cet endommagement. Grâce à une étude détaillée des mécanismes d'endommagement lors de la découpe et à leur modélisation à diverses échelles (dont celle de la nanodureté), il a été possible de proposer des solutions à ce problème. Pour plus de détails, se reporter à l'annexe 5.

Une évolution comparable, bien que moins avancée, se dessine dans le domaine de la *mise en œuvre*, s'agissant notamment des traitements de surface (revêtements inclus) et des procédés d'assemblage (au premier chef, les procédés de soudage). En parallèle à une explosion d'innovations techniques dans les procédés, où l'utilisation du laser joue une place croissante, les efforts de modélisation appellent là aussi une intégration poussée des approches mécaniciennes et métallurgiques.

Notre pays n'est pas mal placé, loin s'en faut, en matière de développement de telles synergies, même si elles n'ont jusqu'ici pas toujours été exploitées autant qu'il était possible jusqu'au stade de l'innovation industrielle. Dès les années

1980, la mise en forme a été un domaine privilégié de collaborations entre métallurgistes et mécaniciens : avec l'appui d'une industrie nationale puissante, dotée d'une forte capacité propre de recherche et d'innovation, les collaborations entre Industrie et Université se sont développées vigoureusement (cf. le GRECO « Grandes déformations et endommagement » et le GIS associé « Mise en forme »). Cette impulsion initiale s'est prolongée sous diverses formes : groupements (CPR « Mise en forme des matériaux : contact métal-outil-lubrifiant », « Précipitation ») et centres de recherche, logiciels de diffusion internationale (Forge), sociétés savantes aux niveaux national (Mecatmat) et international (Esaform)...

- Il existe donc dans ce domaine, aux enjeux sociétaux considérables, un capital de compétences important et de haute qualité. Il dépend avant tout du maintien et du renouvellement de l'expression d'intérêt et du soutien de l'industrie qu'il puisse être pleinement mobilisé ; il faut donc renforcer cet intérêt et ce soutien.

3 | Métallurgie et transports

3.1 Transport aéronautique

Métaux et alliages métalliques sont des composants majeurs de l'industrie aéronautique et aérospatiale. Ils interviennent dans les structures (cellules fuselages, voilures et réservoirs structuraux d'ergols*), les turbomachines (moteurs d'avion), le train d'atterrissage et dans de nombreux équipements annexes. À ce titre, leur maîtrise constitue un enjeu essentiel dans la compétition internationale, ce qui a suscité un effort soutenu de recherche et développement. L'objectif est de diminuer les coûts de construction, de fonctionnement des aéronefs *via* une réduction de leur masse, une augmentation des performances moteurs, un accroissement de leur fiabilité et de leur durée de vie, et une meilleure maîtrise des coûts d'exploitation associés aux procédures d'entretien. À quoi s'ajoute la nécessité d'une diminution des nuisances environnementales : émissions de gaz en croisière, bruit au décollage, utilisation de substances nocives, et problèmes de recyclage (annexe 6).

Pour les lanceurs, la réduction des masses et des coûts permet soit l'augmentation de la masse de la charge utile, soit la réduction du prix du kilogramme mis en orbite.

3.1.1 Un secteur industriel en évolution constante

Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, la Métallurgie joue un rôle déterminant dans le développement d'une industrie aéronautique française, puis européenne, qui occupe les premiers rangs au niveau mondial. L'effort de R&D a porté sur les matériaux constituant les cellules, les moteurs et les équipements.

Parmi les plus grands succès de cette période, on citera : le développement d'alliages d'aluminium de plus en plus performants (en fatigue*, en ténacité, en corrosion...); la mise au point de superalliages à base nickel pour températures de moteurs de plus en plus élevées; la mise au point d'alliages de titane (hautes tenues thermique et mécanique, et allègement des structures); à l'échelle européenne, le succès des lanceurs de la famille Ariane fondé sur des développements métallurgiques souvent très particuliers concernant les réservoirs et moteurs.

Le panorama de l'aéronautique française des années 1970, très concurrentielle à l'international, se caractérisait comme suit :

- les techniques d'élaboration et de transformations métallurgiques sont en place ;
- les alliages d'aluminium à haute performance sont en plein développement et sans concurrents sérieux pour les pièces de voilure ;
- les alliages de titane sont en pleine évolution ;
- les alliages à base nickel pour disques et pales des turbomachines arrivent à leur limite d'utilisation en températures ;
- les aciers restent d'utilisation stable, en particulier les aciers au Ni-Cr-Mo utilisés pour les trains d'atterrissage.

Cette bonne santé va conduire à la naissance (1970) du consortium Airbus-industrie, issu de la fusion des entreprises européennes Aérospatiale, Matra, Daimler-Chrysler Aerospace, CASA et BAE System. La période 1980-2000 est extrêmement dynamique en raison de la croissance du marché aéronautique. L'ossature européenne (Airbus, EADS) favorise une très forte mobilisation en R&D, On profite (1970-1990) d'une relative facilité d'introduction de solutions nouvelles sans procédures lourdes de qualification, non encore rigidifiées et dont la plupart (matériaux de fuselage et de voilure) sont d'origine américaine. C'est alors que sont définis la plupart des alliages en usage aujourd'hui.

Depuis la fin des années 1990, la recherche s'internationalise progressivement avec la vente en 1997 de Howmet à Alcoa et de Cezus à Timet. Suit

(2003) l'acquisition de Pechiney par Alcan (lui-même intégré dans Rio Tinto en 2007). Les compétences R&D du Centre de recherches de Voreppe ont été élargies au service de l'innovation-produits, en co-développement avec les clients de l'aéronautique. Le groupe Aubert et Duval, intégré dans Eramet, est maintenant le seul « élaborateur » de superalliages en France. Dans l'aéronautique, le développement de la Métallurgie s'effectue dans un contexte de forte demande d'utilisateurs (avionneurs, motoristes). Les compétitions intenses entre Boeing et Airbus, comme entre Safran, Rolls-Royce et GE, illustrent le caractère stratégique du secteur.

3.1.2 Des cahiers des charges exigeants, des besoins de recherche importants

Les transports aériens sont de plus en plus soumis aux contraintes que sont : la réduction de la consommation en carburant, la réduction des coûts de fabrication et de maintenance, l'augmentation de la fiabilité et de la durée de vie des avions. D'où, en amont, un effort général et récurrent pour améliorer les performances spécifiques (rapportées à la densité) et la reproductibilité des propriétés des alliages. Ces dernières sont déterminées par la microstructure du matériau, elle-même directement issue de procédés d'élaboration toujours plus complexes.

Les exigences des cahiers des charges imposent de classer les matériaux en trois familles : la cellule, les moteurs, les équipements.

a) Le *fuselage* et la *voilure* sont soumis à des températures de modérées à froides et aux exigences de rigidité, de résistance mécanique en compression, de tolérance au dommage et/ou en fatigue. La course à l'allègement est une force motrice majeure d'évolution. Ainsi, les alliages d'aluminium sont fortement concurrencés par les composites à matrice polymère et à renforts tissés. Après l'abandon au début des années 1990, pour des raisons surtout économiques, du développement d'alliages radicalement nouveaux à forte teneur en lithium, les producteurs d'aluminium ont répondu par des améliorations incrémentales, mais importantes, des alliages classiques des séries dites 2000 et 7000. Combinées à la mise en œuvre de nouveaux traitements thermiques, elles ont permis des allègements de l'ordre de 10 % par rapport aux alliages de la génération A330-340. D'où une bonne résistance à la percée récente des composites : ainsi la structure de l'A380, comprend plus de 60 % d'alliages d'aluminium (annexe 7).

De cette compétition entre alliages et composites sont nés de nouveaux alliages (par ex. : aluminium-cuivre-lithium-argent) à densité réduite et meilleurs

en tenue à la corrosion et en tolérance au dommage. De même, la coexistence avec les matériaux organiques donne des atouts nouveaux aux alliages de titane. La mise en œuvre (détensionnement des pièces, nouvelles techniques d'assemblage, traitements de surface) se rénove et des Métallurgies non conventionnelles (frittage*, solidification rapide...) s'installent dans un paysage où la Métallurgie physique (choix des éléments d'alliage, optimisation des traitements thermiques...), la mécanique (précipitation, anisotropies...) et la physicochimie (corrosion...) sont devenus des alliés essentiels.

Histoire passionnante, entre bien d'autres, que celle de l'étude des alliages Al-Li. Les premiers alliages, riches en Li, s'avéraient être prometteurs pour leur densité moindre que celle des alliages Al-Cu. Leur ténacité et leurs propriétés en fatigue en a rendu inapproprié leur usage. En revanche, on fonde toujours beaucoup d'espoirs dans le développement de nouveaux alliages Al-Li-Cu, moins riches en Li (environ 0,9 à 1,6 %). Ainsi les alliages 2198 et 2050 développés par Alcan offrent une amélioration importante du compromis entre résistance mécanique, tolérance au dommage et une amélioration très sensible de leur tenue en corrosion, ainsi qu'une stabilité de leurs propriétés après exposition prolongée à température modérée (voir annexe 7).

b) Les matériaux des *moteurs* doivent présenter un bon comportement à chaud, dans des environnements chimiquement agressifs : tenue au fluage* et à l'oxydation. On distingue les matériaux de moyenne température (100 °C-500 °C), alliages de titane et aciers à haute résistance, et les matériaux de hautes et très hautes températures (≥ 600 °C) comme ceux des disques ou des aubes. Face aux composites thermostrostructuraux céramique/céramique, la Métallurgie a répondu par une intégration associant matériau, circuits de refroidissement et barrières thermiques contre l'oxydation : logique de système. La maîtrise des procédés de fabrication (solidification contrôlée, forge ou Métallurgie des poudres) requiert des modélisations mêlant analyse physique, et faisabilité industrielle. La nécessité d'accroître les températures de fonctionnement conduit à développer des matériaux nouveaux (aluminures de titane ou composites à base titane), et des barrières thermiques.

c) Les matériaux de certains des *équipements annexes* (par exemple : train d'atterrissage) doivent répondre à des fortes sollicitations. On utilise là des aciers à très haute résistance, des alliages d'aluminium et des alliages de titane à hautes propriétés mécaniques, et des alliages de cuivre pour les bagues et paliers.



Figure 2.1

Aube monocristalline de turbine haute pression en superalliage AM1 (moteur Snecma M88-2), revêtue d'une barrière thermique. Le caractère monocristallin de l'aube réduit fortement les risques de fluage et de fissuration. Hauteur de l'aube environ 10 cm. Les trous et le revêtement permettent un refroidissement plus efficace de l'aube.

Dans les domaines actuels de la Métallurgie de l'aéronautique, citons au moins les recommandations suivantes, à prendre impérativement en considération :

- une *intégration* des procédés (de l'élaboration amont à la mise en œuvre aval) et du matériau, imposée par le contrôle accru de la reproductibilité des propriétés, l'optimisation des performances, et la prise en compte des problèmes d'environnement face au long cycle de vie des produits ;
- un rôle croissant de la *modélisation métallurgique* – s'appuyant sur des bases physiques et mécaniques (cf. chapitre 1) et non plus sur une simple phénoménologie – pour guider le développement des alliages et des traitements thermomécaniques ;
- une meilleure prise en compte de la *mise en œuvre* (conception et dimensionnement des pièces pour applications structurales, usinage, assemblage, traitements de surface) intégrant la Métallurgie dans une logique de système.

3.2 Transport ferroviaire

Transport terrestre potentiellement le moins polluant par voyageur au km ou par tonne transportée au km, le transport ferroviaire est appelé à croître. La France et l'Allemagne sont bien placées, par la taille de leur réseau comme par leur niveau parmi les équipementiers. Les développements en cours, le transport passager à grande vitesse et un transport de fret performant passent par une maîtrise des métaux, notamment l'acier qui reste, dans ce domaine, le matériau-roi (annexe 8).

- S'agissant des rails et des équipements au sol, la durabilité en usure et la fiabilité dimensionnelle sont les critères majeurs, qui requièrent des métallurgistes maîtrisant la double approche matériaux et procédés. La com-

préhension fine des transformations induites par déformation intense en sous-couche de contact permet de contrôler l'usure, tandis que la connaissance des cinétiques de transformation dans la masse des rails permet d'assurer à la fois leur rectitude et un niveau de contraintes internes faible et reproductible.

- Pour les équipements embarqués, sécurité, fiabilité, consommation d'énergie et confort sont les points-clés du choix des matériaux, des modes de conception ou des nouveaux systèmes embarqués dans le matériel roulant. En découle une recherche permanente en durabilité (résistance à l'usure, à la fatigue, à la corrosion...), en allègement, en éco-conception (matériaux, revêtements – en particulier peintures –, mais aussi en systèmes de récupération d'énergie...), en émission sonore ou en protection contre le bruit. Les stratégies d'amélioration des produits (en particulier des freins) consistent à utiliser des matériaux existants, à les intégrer dans des conceptions de systèmes de plus en plus performants, en gardant en permanence à l'esprit les exigences de l'entretien des composants.

Ces impératifs sur les produits requièrent une excellente maîtrise de la Métallurgie intégrant, ici encore, une dimension « systémique ».

3.3 Transport routier

Les transports terrestres (avec, au premier rang, l'industrie automobile) représentent un marché majeur pour l'industrie métallurgique. Le transport routier fait face à un défi important : comment continuer à fournir le service demandé (transport de voyageurs ou de marchandises dans de bonnes conditions de sécurité et de confort) tout en diminuant de façon significative l'impact sur l'environnement. Ce défi a été en large partie relevé grâce à la mise au point de nouveaux aciers et de nouvelles Métallurgies conduisant à des développements considérables (annexe 9). On peut ainsi dire qu'en 2010, une automobile renferme bon nombre d'aciers qui n'existaient pas quelques années auparavant.

Le transport terrestre, en particulier routier, est responsable d'une bonne part des émissions de gaz à effet de serre. L'objectif de les réduire a conduit les constructeurs automobiles à envisager deux stratégies. On peut d'abord, restant dans les mêmes types de motorisation, diminuer la consommation, ce qui passe notamment par un allègement des véhicules. On peut aussi rechercher d'autres types de motorisation, utilisés seuls ou en association : moteur électrique, piles à combustibles... Dans les deux cas, la Métallurgie est un passage obligé : quelle que soit la motorisation, les organes mécaniques transmettant le mouvement aux roues, soumis à des efforts mécaniques importants, à des températures parfois élevées et à diverses corrosions relèvent de la Métallurgie.

Par ailleurs, l'habitacle doit procurer confort et sécurité. Les polymères y sont utilisés, surtout comme matériaux d'habillage ; mais s'agissant de rigidité ou de résistance à la fatigue, ce sont les aciers et les alliages d'aluminium qui s'imposent (structures, carrosseries, groupes motopropulseurs, équipements) par leur disponibilité à grande échelle sous forme de demi-produits, et leur aptitude à la mise en œuvre (formage, assemblage, traitement de surface, moulage, etc.) et au recyclage.

On distingue la « caisse en blanc* » et la « carrosserie » qui relèvent de cahiers des charges très différents. Pour la première, les exigences portent sur les propriétés mécaniques (résistance mécanique, rigidité, tenue au « crash »), la résistance à la corrosion, le « design », la réparabilité, et les réductions de la masse et des coûts. Pour la seconde, le choix des tôles utilisées en panneau extérieur dépendra de leur formabilité, leur aptitude à la découpe, leurs caractéristiques mécaniques après traitement de cuisson des peintures, leur résistance à l'indentation et leur aspect de surface.

Les matériaux, la conception mécanique des composants (intégration de fonctions, diminution du nombre de pièces) et les technologies d'assemblage sont, avec l'architecture des véhicules et les systèmes de production, des domaines clés de compétences métallurgiques. Y dominent les aciers et les alliages d'aluminium. Le titane serait dans la liste si son coût de production pouvait être réduit, l'électrolyse étant ici prometteuse mais sans avoir atteint la taille industrielle. Les alliages de magnésium sont utilisés marginalement (roues de véhicules haut de gamme...). S'agissant des aciers et de l'aluminium, tout allègement est à confronter aux propriétés mécaniques : limite d'élasticité, limite à rupture plus élevées sans perte appréciable de formabilité. Ces deux propriétés étant naturellement contradictoires, c'est toute la Métallurgie physique et mécanique qui doit être mise en œuvre pour obtenir le meilleur compromis possible.

La mise en œuvre (mise en forme et assemblage) est un domaine en forte évolution. L'emboutissage est très étudié (notamment pour la maîtrise du retour élastique et le formage de pièces de formes complexes exigeant des sauts de formabilité : emboutissage à tiède), ainsi que les techniques innovantes comme l'hydroformage*. Pour l'assemblage, on mentionnera le soudage laser, le soudage par points (aciers), l'assemblage hybride aluminium-acier (thème de R&D à fort enjeu, notamment par soudo-brasage laser), et le collage. Le soudage à l'état solide par friction-malaxage* (FSW : *friction stir welding*) déjà utilisé dans l'industrie aéronautique doit également pouvoir se développer dans l'industrie automobile.

On l'aura compris, la voiture de demain sera « multimatériaux » et tout laisse penser que les métaux continueront à en constituer la plus grande part, les recherches se concentrant sur l'allègement. C'est le cas pour la France

qui, disposant de laboratoires leaders pour l'acier (Lorraine), et l'aluminium (Dauphiné), reliés à un réseau de laboratoires publics, est bien placée face au Japon, à l'Allemagne, au Canada et, plus récemment, à la Chine. Mais si notre position jouit encore d'une bonne image (jusqu'à quand?), elle s'érode régulièrement.

Au niveau des recommandations disons que :

- les enjeux étant ici énormes, ils justifient le maintien de fortes compétences en Métallurgie physique et en mécanique (problèmes de textures, de plasticité, d'anisotropie...). De nombreuses études doivent être consacrées à l'assemblage (et au désassemblage) des matériaux métalliques avec d'autres matériaux, comme les polymères et les composites. Nos laboratoires sont bons (les liens avec les sous-traitants restant néanmoins à renforcer), notamment en caractérisation de matériaux à petite échelle et en modélisation de leur comportement mécanique au cours de la mise en forme. Toutefois, contrairement à de grands centres de recherche étrangers (par exemple, celui d'Aix-la-Chapelle), ils disposent de peu de moyens semi-lourds dans les techniques de mise en forme et de mise en œuvre aval, en synergie avec les approches métallurgiques de base. Une action doit impérativement être lancée en ce sens.

3.4 Transport maritime

3.4.1 Situation générale

L'industrie navale française emploie environ 40 000 personnes et se situe au 2^e rang européen et au 6^e rang mondial du marché civil et militaire. La construction des navires de grandes dimensions est réalisée sur plusieurs sites :

- Saint-Nazaire, STX Europe (exemple : chantiers de l'Atlantique) ;
- Brest, DCNS, héritière de la Direction des constructions navales de la DGA ;
- Lorient, STX Europe et DCNS ;
- Cherbourg, Constructions Mécaniques de Normandie (CMN) (annexe 10).

Dans la quasi-totalité des cas, les coques de ces navires sont construites en acier, à partir de tôles dont l'épaisseur n'excède généralement pas 20 mm, qui sont découpées, mises en forme et soudées. Suite aux ruptures catastrophiques d'une centaine de *Liberty Ships* au niveau des cordons de soudures lors de la

Seconde Guerre mondiale, des travaux ont été engagés dans le monde entier pour mieux définir la notion de température de transition ductile-fragile, et, plus tard, développer la mécanique de la rupture. Dans les normes actuelles et pour les applications les plus sévères, l'énergie à rupture par flexion par choc doit dépasser 41 joules à $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces aciers doivent, en plus, présenter une bonne tenue à la corrosion et être facilement soudables. L'amélioration de l'aptitude au soudage passe par la diminution de la teneur en carbone. Afin de maintenir les caractéristiques mécaniques, cette réduction de la teneur en carbone est compensée par la production d'aciers à grains fins (composition chimique et traitements thermomécaniques de laminage).

Les sous-marins nucléaires, construits à Cherbourg, présentent un concentré de prouesses technologiques. Leur fabrication fait appel à la mise au point de nuances à haute résistance, 80 HLES et 100 HLES dont les limites d'élasticité sont respectivement de 800 et 1 000 MPa.

Les coques en alliages d'aluminium sont, au niveau national, limitées à quelques yachts de grandes dimensions, des bateaux de pêche et de service. Les nuances utilisées doivent être soudables et résister à la corrosion marine. Elles se limitent aux alliages de la série 5 000 et à des profilés de la série 6 000³.

3.4.2 Transport de gaz naturel liquéfié

Au cours des dernières années, le gaz naturel a vu sa consommation augmenter de façon spectaculaire. Sur un marché mondial d'environ 2 700 Gm³, environ 20 % sont aujourd'hui acheminés par mer et le transport maritime du gaz naturel liquéfié (GNL) augmente régulièrement (7 %/an en moyenne sur les 5 dernières années) (annexe 11). Un méthanier actuel a une taille comparable à celle d'un pétrolier et peut contenir jusqu'à 260 000 m³ de GNL. Sur une flotte en service d'environ 350 méthaniers, 40 % utilisent des sphères d'aluminium, 35 % de l'Invar et 25 % de l'acier inoxydable. Les constructions et les commandes en cours sont majoritairement en faveur des deux dernières technologies, en particulier celle à membranes d'Invar. Cette dernière solution permet de s'affranchir de la nécessité du gaufrage avec l'acier inoxydable et permet ainsi de monter une grande partie des cuves par des procédés automatiques ou semi-automatiques (cf. encadré).

L'usine d'Imphy (France) d'ArcelorMittal assure 95 % du marché mondial, soit plusieurs milliers de tonnes par an d'Invar M93 et un chiffre d'affaires de 50 à 60 M€.

³À signaler que la navigation de plaisance constitue un secteur très dynamique en France qui occupe la 1^{re} place mondiale pour les voiliers et la 4^e pour les bateaux à moteur. Ces bateaux sont, pour la plupart, réalisés en composite verre-résine.

L'Invar est un fer-30 % nickel de coefficient de dilatation thermique 10 fois inférieur à celui des aciers. Découvert en 1896, en collaboration avec la Société Imphy, par Charles-Édouard Guillaume – ce qui lui vaudra le seul prix Nobel jamais attribué à un métallurgiste – ses premières applications furent en métrologie. Son utilisation permet de réduire fortement les contraintes thermiques entre la température ordinaire et celle du GNL ($-160\text{ }^{\circ}\text{C}$).

L'essor des navires méthaniers illustre bien la vitalité de la construction navale et la place que notre pays y tient. Sur un marché mondial de $\approx 2\,700\text{ Gm}^3$ de gaz naturel (GN), 20 % sont aujourd'hui acheminés par mer sous forme liquéfiée (GNL) à $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, dans des cuves imaginées dans les années 1960 par la société Gaz Transport (GTT).

Ces cuves en Invar (alliage Fe-36 %Ni) sont séparées de la coque en acier par un isolant thermique. Un méthanier peut ainsi transporter, sous forme liquide, jusqu'à $260\,000\text{ m}^3$ de gaz. La Société Imphy d'ArcelorMittal a mis au point un Invar à très basse teneur en soufre qui évite les transformations dites « martensitiques » susceptibles de se produire en cas de déformation (cf. figure et annexe 11). Elle détient actuellement la quasi-totalité du marché mondial de cet alliage.

Les alliages de type Invar (Fe-Ni) sont largement employés dans l'industrie des semi-conducteurs et de la connectique.



Figure 2.2
Cuve en Invar d'un méthanier. Le personnage, en bas à gauche, donne l'échelle.

Cet alliage doit, en outre, présenter une bonne résistance à la corrosion ainsi qu'une grande stabilité microstructurale, même en présence de fortes déformations plastiques. Par ailleurs, il doit pouvoir être soudé facilement, un méthanier renfermant plusieurs centaines de km de soudures.

- La construction maritime, on l'a vu, fait largement appel à la technique d'assemblage par soudage. Les recherches dans ce domaine d'assemblage (procédé et modélisation) doivent être fortement soutenues, ainsi que celles consacrées aux aciers au carbone à haute résistance et néanmoins soudables, si possible sans préchauffage.
- La position de leadership de la France dans le domaine de la fabrication de l'Invar doit bien évidemment être maintenue. Ceci est d'autant plus vrai que le transfert du GNL depuis la station de liquéfaction vers le navire et, en fin de transport, du navire vers la station de gazéification, effectué encore majoritairement à quai, va changer progressivement, certains sites ne permettant pas l'approche pour un déchargement au large. L'utilisation de l'Invar avec ses intéressantes propriétés de faible dilatabilité pourrait s'avérer décisive.

4 | Métallurgie et énergie nucléaire

La France occupe là une place particulière : première pour la proportion de production d'électricité « nucléaire », elle l'est aussi pour la cohérence du parc de réacteurs qui assure un retour d'expérience focalisé, lié à la centralisation de l'industrie correspondante ; enfin, son choix de retraiter le combustible usagé, pour en extraire les matières fissiles et diminuer la quantité de déchets ultimes, est exemplaire au niveau international. Les matériaux sont un élément crucial de la gestion du parc (durée de vie et rentabilité des installations, conditionnement des déchets, démantèlement...), de son renouvellement à l'échelle de la décennie et de la préparation de l'avenir – retraitement des combustibles irradiés des surgénérateurs* de 4^e génération prévus par la loi de 2006 – (annexe 12).

4.1 Des métaux, dont certains inhabituels...

Outre l'étude de métaux nouveaux ou peu pratiqués (U, Pu, Zr, Mg, Be, Hf...), la construction des réacteurs pose des problèmes métallurgiques majeurs. Les dimensions croissant avec la puissance des réacteurs, les limites des capacités de fabrication des aciéristes et des forgerons sont vite atteintes, tandis que le gigantisme pèse sur le choix des matériaux quant à leurs caractéristiques et à la « fabricabilité » des pièces, en termes par exemple d'homogénéité, dans l'épaisseur, des composants.

La fabrication de ces derniers a bénéficié, et parfois été à l'origine, de nouveaux procédés. Ainsi, pour la cuve des réacteurs à eau sous pression (REP), les propriétés (ténacité*...) des aciers ont progressé grâce aux avancées des

aciéristes (contrôle de la teneur en cuivre, diminution des teneurs en S et P, rétrécissement des fourchettes de variation de certains éléments...). De nouveaux types de lingots (lingots creux) ont permis de maîtriser la localisation des veines ségréguées, en particulier dans les viroles de cœur, d'où un net progrès sur la sécurité. Quant à la composition des alliages exposés aux neutrons, elle doit tenir compte des transmutations* qui peuvent rendre difficilement manipulables les pièces lors des démantèlements. Pour les gaines du combustible, tubes en contact à la fois avec celui-ci et avec le caloporteur, Areva, avec sa filiale Cezus, est leader mondial, avec une Métallurgie du zirconium qui va de l'élaboration (avec séparation du hafnium) aux propriétés sous (et post-) irradiation. À la suite d'un programme de développement lancé depuis le début des années 1990, Areva commercialise depuis plus de 10 ans l'alliage M5™, le plus performant du marché, tout en poursuivant avec les partenaires français les études de compréhension du comportement en service.

Compte tenu des investissements impliqués, des exigences de sécurité et du coût du retour d'expérience, une problématique fondamentale de cette Métallurgie est la prédiction du comportement à long terme (40 à 60 ans) des composants : tenue à la fatigue* (notamment thermique), à la corrosion (notamment sous contrainte) et, bien sûr, à l'irradiation.

4.2 ... soumis à irradiation...

Le flux des neutrons et, dans le combustible, le flux des fragments de fission induisent des effets spécifiques dans les matériaux dont ils altèrent les propriétés. L'effet élémentaire est un déplacement, par simples chocs, des atomes et une création de défauts ponctuels (cf. chapitre 1 § 2.) dont l'accumulation peut avoir des conséquences redoutables.

C'est l'ignorance d'un effet lié à l'énergie emmagasinée par les défauts ponctuels (l'effet Wigner) qui a causé, en 1958, le dramatique incendie du réacteur nucléaire de Windscale sur les côtes du Cumberland, les physiciens britanniques n'ayant pas, à l'époque, été informés par leurs collègues américains de cet effet encore classifié.

Parmi celles-ci, les variations de forme et/ou de volume (« croissance » et gonflement), ainsi que les altérations des propriétés mécaniques, sont parmi les plus étonnantes : une irradiation de quelques minutes dans un réacteur rend sonore une cloche en plomb ! Certes les effets les plus spectaculaires sont maîtrisés, mais il demeure une longue liste d'effets dont l'étude est à la fois difficile et passionnante : en l'absence d'une phénoménologie macroscopique simple, on ne

sait les décrire qu'à l'échelle atomique. Éjection d'atomes de leur site, mélange des divers constituants, « cascades » de chocs, formation d'amas de défauts (mobiles ou immobiles), réactions nucléaires... se produisent aux échelles de temps de la vibration atomique ; après quoi, à celles de l'ingénieur, se produit une lente évolution des propriétés : variations des dimensions (sans ou sous contrainte), inversions de stabilité des phases (ségrégations, dissolution ou précipitation induites par l'irradiation), modification des modes de corrosion...



Figure 2.3
Un effet spectaculaire de l'irradiation.

L'échantillon cylindrique d'uranium α (haut) a passé un mois dans un réacteur nucléaire à ~ 100 °C. Il est devenu (bas), à volume constant, une sorte de fil enchevêtré : c'est le phénomène de « croissance », dû à une accumulation, dans le métal, de « boucles de dislocations » dans des directions cristallographiques préférentielles. En pratique, on n'utilise bien sûr jamais l'uranium sous cette forme α dans les réacteurs. Jacqueline Bloch, CEA.

Les observations expérimentales se font soit sur des pièces réelles de réacteurs (souvent très radioactives) examinées en « labo chaud », soit sur des échantillons irradiés par des particules (neutrons, électrons, ions...), permettant des conditions d'irradiation variées et, souvent, des observations *in situ*.

C'est grâce à des irradiations par des particules chargées qu'ont été découverts les effets de débit de dose*, et de taille des cascades, sur la stabilité des alliages sous irradiation.

Du point de vue théorique, un alliage sous irradiation est un système forcé, un apport permanent d'énergie stabilisant des organisations de matière autres que celles d'équilibre. La théorie de ces systèmes, initiée en France, est dans l'enfance. La modélisation numérique y joue un rôle central : modélisation des défauts ponctuels et de leurs amas ; de l'interaction de ces amas et des dislocations ; des cascades* ; de l'évolution des défauts et des variations de dimensions induites ; de la localisation du glissement dans une population d'amas... D'où l'interprétation de mesures d'effets d'irradiation faites à des échelles supra-atomiques : c'est la « modélisation multi-échelle ».

Dès les années 1970-1980, des modélisations simples du « gonflement* » des aciers dans les réacteurs à neutrons rapides et de la croissance des zircaloys dans les réacteurs CANDU avaient été appliquées avec un certain succès. Des tentatives sont en cours (EDF, CEA, Areva) pour mieux maîtriser les réseaux

de dislocations développés et faire bénéficier les codes de calculs des outils de modélisation multi-échelle ici évoqués. Pour l'ingénieur formé aux modélisations macroscopiques, c'est une révolution.

4.3 ... et présents lors du stockage

Les « déchets » (qui sont des noyaux) radioactifs peuvent être soit transmutés à l'aide de neutrons rapides, soit stockés. Aussi la « Commission Castaing » (1995) avait-elle recommandé que soient lancées des expériences de transmutation dans le réacteur Superphénix. Mais la décision (gouvernementale) fut prise, au contraire, de le démanteler. Le stockage, quel qu'en soit le type, et le transport mettent en jeu des conteneurs métalliques dont les propriétés doivent obéir à des contraintes jamais rencontrées jusqu'à présent. Si les « châteaux de plomb » nécessaires au transport ne posent pas de problème particulier, on demande en revanche, aux fûts de stockage et aux verres enrobant les matériaux stockés, des qualités exceptionnelles : celle en particulier de résister, durant des périodes comptées ici en dizaines de millénaires, au rayonnement dégagé et aux températures qu'il produit et à la corrosion de l'eau (présente partout). Entre le cuivre, prévu par les Suédois, et des aciers encore à déterminer, comme pour les bases scientifiques du vieillissement des verres de stockage sous irradiation, s'ouvre un grand chantier largement inédit. D'importantes recherches sont là nécessaires.

La plupart des recherches évoquées ici (irradiations, modélisations...) doivent être amplifiées, pour les réacteurs à fission* actuels et futurs (ainsi des aciers ferritiques ou martensitiques renforcés par dispersions d'oxydes : ODS ; des alliages de gainage...), et pour les futurs réacteurs à fusion où l'effet de l'hélium produit par les neutrons de 14 MeV doit donner lieu à un programme spécifique d'études.

Les principales recommandations dans le domaine de la métallurgie du nucléaire sont les suivantes :

- Pour les réacteurs existants et ceux de la 3^e génération (EPR), il est indispensable de maintenir un niveau de compétences suffisant pour les problèmes susceptibles d'être rencontrés en cours d'exploitation, comme la fragilisation par irradiation qui est maîtrisée et la corrosion sous contrainte assistée (ou non) par l'irradiation.
- L'effet de l'irradiation sur la fragilisation des aciers de cuve pour les réacteurs EPR de 3^e génération est également maîtrisé. Cet effet est moins marqué que pour les réacteurs actuels (en augmentant le diamètre de la

cuve, on a diminué la dose neutronique reçue). Il faut sans doute se préoccuper des effets du vieillissement thermique sur ces aciers, notamment dans les joints soudés.

- Les réacteurs de 4^e génération, même s'ils ne sont pas encore dans leur configuration définitive, devront opérer à plus haute température (> 500 – 550 °C). De nouveaux alliages ou des alliages existants devront être développés (aciers ferritiques améliorés et aciers ODS*) dont la fabrication et la mise en œuvre restent à maîtriser (aciers ODS) et dont on connaît très mal le comportement à long terme sous irradiation. Suite à l'arrêt des réacteurs rapides (Phenix* vient d'être définitivement arrêté), les études de comportement (fluage, fatigue-fluage, oxydation) des matériaux de structure des réacteurs électronucléaires sont handicapées. Le retraitement des combustibles irradiés de ces surgénérateurs doit être mis au point.
- Pour les éventuels réacteurs à fusion*, la situation est compliquée par le dopage en He qui résulte des réactions (n, α) produites par les neutrons de 14 MeV. La démarche de recherche et développement présentée ci-dessus doit inclure cette éventualité.
- Les équipes françaises contribuent de manière tout à fait notoire, au niveau mondial, au développement de la Métallurgie de base pour le nucléaire ; une relance de la Métallurgie pratique, tirant profit des avancées de base des deux dernières décennies devrait être encouragée, pour remettre rapidement la France, sur ces sujets, au niveau d'autres pays, comme le Japon (voir aussi recommandations chapitre 3).
- L'existence d'un parc cohérent de moyens d'irradiation par particules chargées associé à des moyens de caractérisation physicochimique modernes ainsi qu'une communauté scientifique au bon niveau en nombre et compétence seront des éléments essentiels pour la maîtrise de la physique des effets d'irradiation, leur modélisation à l'échelle pertinente, et, un nucléaire de quatrième génération fiable et sûr.
- Il est primordial de remettre à l'ordre du jour un enseignement dédié aux matériaux du nucléaire (cours d'écoles d'ingénieurs, formations doctorales, écoles d'été), solidement adossé à des formations généralistes en métallurgie. Un effort spécifique sur les processus chimiques de retraitement des combustibles irradiés est nécessaire.

5 | Autres énergies

5.1 Énergie solaire

L'utilisation de l'énergie solaire thermique à des fins domestiques a d'abord consisté à chauffer l'eau comme fluide caloporteur dans les installations de chauffe-eau existantes. Le cuivre s'imposa comme le matériau de référence, d'autant que de nouveaux traitements de la surface intérieure des tubes (années 1980) ont permis d'éliminer quasiment les perforations par corrosion. Mais son inconvénient est son prix. Pour couvrir de grandes surfaces, des tubes en polymère noircis peuvent convenir, mais avec un rendement limité. L'aluminium est utilisé pour les ailettes.

Ceci étant, l'incitation à innover dans cette Métallurgie est, en France, relativement faible, le thermique solaire représentant pour le cuivre un petit marché. En 2008, la consommation en tubes et laminés – importés en grande partie d'Allemagne – a été inférieure à 800 t, et ne devrait pas dépasser 6 000 t en 2020. Notons que s'il existe encore en France un important site de fabrication de tubes en cuivre, le laminage en grandes largeurs a été abandonné depuis longtemps. Les deux usines de laminage restantes sont spécialisées dans la production de bandes en alliages de cuivre (annexe 13).

Il serait cependant possible de redévelopper une Métallurgie du cuivre visant à utiliser l'énergie solaire thermique plus efficacement et à moindre coût. Il s'agirait d'étudier en particulier :

- la réalisation de capteurs amenant, en régime permanent, la température du fluide caloporteur à des températures intermédiaire (80-250 °C) en vue d'applications industrielles ;
- le stockage de l'énergie en chaleur latente, utilisant des sels fondus ou des matériaux à transformation de phase, imbriqués dans une matrice de bonne conductivité thermique ;
- l'utilisation accrue de cette énergie pour la production de froid destiné à la climatisation.

5.2 Piles à combustibles : besoins et défis métallurgiques

Les piles à combustibles (PAC) font l'objet d'actives recherches concernant le stockage de l'énergie dans des accumulateurs et la conversion de l'hydrogène

en énergie électrique via des piles « basse température » (PEMFC⁴ à membrane polymère). L'objectif, à échéance 2015-2020, est de développer des systèmes hybrides batteries/PAC dont le degré d'hybridation dépendra des progrès respectifs des deux technologies (coût, performance, durée de vie, accès aux matières premières) et du profil d'emploi du véhicule. Les piles « haute température » (SOFC⁵, 700-902 °C) sont prévues dans le secteur du stationnaire, à savoir comme moyen de production décentralisée d'électricité en particulier en couplage avec la production de chaleur (système de cogénération électricité-chaleur) pour lesquels on peut espérer des rendements globaux supérieurs à 70 %.

5.2.1 Verrous scientifiques

Les verrous scientifiques et technologiques sont différents suivant le type de pile à combustible, PEMFC et SOFC (annexe 14).

La pile PEMFC utilise du platine comme catalyseur. Les verrous concernent essentiellement la réduction du coût, la durabilité (empoisonnement de la membrane polymère) et le vieillissement des plaques bipolaires, ou interconnecteurs, réalisées en acier inoxydable. Ceux-ci doivent résister à l'oxydation en atmosphère riche en oxygène d'un côté et riche en vapeur d'eau de l'autre. Une des solutions consiste à recouvrir les plaques d'acier inoxydable par de l'or ou d'autres revêtements.

Ainsi, une ligne de pilote semi-industrielle, pouvant servir à cet effet, tourne à Liège. Elle appartient à une *joint-venture* entre ArcelorMittal et la région wallonne. Il s'agit d'une ligne « tout sous vide » : des dérouleurs, des sas, une unité de nettoyage par plasma, une unité de dépôts micrométriques de métaux (Zn, Al, Mg, Sn...) et une unité de dépôts nanométriques très versatile, un autre sas et des enrouleurs. De nombreux produits sont étudiés et vont sans doute donner lieu à une industrialisation prochaine.

La pile haute température SOFC pose d'autres problèmes. Les plaques bipolaires de ces piles doivent, en plus des critères déjà cités pour les piles PEMFC, présenter un faible coefficient de dilatation afin de limiter les problèmes de retraits différentiels entre membranes céramiques et plaques métalliques. Elles doivent également résister à des atmosphères fortement corrosives.

⁴PEMFC : *proton exchange membrane fuel cell - polymer electrolyte membrane fuel cell*.

⁵SOFC : *solid oxide fuel cell*.

5.2.2 État des recherches en France et à l'international

En ce qui concerne la recherche de nouvelles nuances d'acier susceptibles de répondre aux exigences des piles à combustibles PEMFC et SOFC, la société ArcelorMittal Stainless & Nickel alloys (en particulier ses filiales ex Imphy-alloys et ex-Ugine) est bien placée. Il s'agit ici d'optimiser des nuances existantes pour maîtriser la composition des couches de protection et de définir des traitements de surface adaptés. La société Garlock France est en train d'acquiescer un savoir-faire sur l'emboutissage des plaques bipolaires, qu'elles soient en acier ou en alliage de nickel.

Les conditions particulières auxquelles sont soumis les métaux des piles à combustibles nécessitent la mise en place de programmes de recherche et de développement dans divers domaines. Citons :

- pour les piles PEMFC, le développement de traitements de surface, par exemple de passivation chromique, pour éviter le recours à des coûteux métaux précieux ;
- pour les piles SOFC, le développement d'alliages chromes-formeurs pour les plaques métalliques, la mise au point de nouveaux alliages et surtout la recherche de revêtements.

5.3 Énergie éolienne

On notera ici simplement la faiblesse de l'effort industriel français pour cette énergie, malgré son implantation notable, et la participation de Saint-Gobain à l'effort allemand.

6 | Magnétisme et Métallurgie

La science des matériaux magnétiques est intimement liée à la Métallurgie. Les principales applications du magnétisme utilisent des alliages à base de fer, cobalt ou nickel, dont les propriétés fonctionnelles dépendent, de façon cruciale, de la microstructure (annexe 15).

Pour une large catégorie de matériaux (matériaux doux, médias d'enregistrement, matériaux durs), la valeur de la coercitivité (résistance de l'aimantation à un champ magnétique appliqué qui tend à la retourner) constitue un paramètre essentiel. La coercitivité est une propriété extrinsèque, profondément dépendante

de la microstructure. L'élaboration des matériaux met en jeu des processus métallurgiques rigoureux et spécifiques.

Les applications classiques des matériaux doux utilisent des tôles laminées (Fe-Si en particulier). La métallurgie des poudres permet la fabrication de matériaux de propriétés modestes à moindre coût. Des rubans de très haute perméabilité sont obtenus par trempe rapide. L'existence de déformations mécaniques peut fortement altérer la perméabilité magnétique des matériaux doux. Réciproquement, certains capteurs exploitent cette propriété.

Les domaines d'applications des matériaux doux qui se développent le plus concernent l'aviation et les capteurs.

Le domaine de l'enregistrement magnétique est marqué par le développement récent de l'enregistrement dit perpendiculaire. Les médias supports d'enregistrement sont des alliages CoCrPt, déposés par pulvérisation cathodique sur une couche douce de FeNi. La surface des cristallites est recouverte d'une couche isolante, non magnétique qui assure leur découplage magnétique, la taille des cristallites ne dépasse pas quelques nanomètres.

Après l'informatique, d'autres domaines d'applications s'ouvrent aux aimants RFeB, en particulier dans l'automobile. Ils requièrent des matériaux plus performants à haute température. Dans les matériaux de type spring-magnets, associant grains doux et durs, la taille des cristallites, trop importante, ne permet pas le durcissement complet des grains doux. Les aimants de type FePt ou CoPt en couches pourraient trouver application au sein de micro-systèmes (MAG-MEMS).

La mise au point des aimants RFeB a largement contribué à la « miniaturisation » des moteurs électriques capables de développer des puissances de l'ordre du kilowatt, suffisantes pour le « vélo électrique » alors qu'ils ont une masse de l'ordre du kilogramme. On peut songer au marché qui peut ainsi s'ouvrir en Chine et ailleurs.

Les autres applications des matériaux magnétiques exploitent des propriétés de couplage : une propriété « non magnétique » est affectée par un changement de l'état magnétique du matériau. La magnétorésistance géante (GMR : *giant magnetoresistance*) a marqué le début d'un domaine en extraordinaire expansion, l'électronique de spin. Les matériaux associés sont très généralement constitués d'un empilement de couches variées de quelques nanomètres d'épaisseur. Les capteurs GMR puis TMR : *tunnel magnetoresistance* (magnétorésistance tunnel) sont utilisés en particulier dans les têtes de lecture de disques durs. Les MRAM (*magnetic random access memories*) constituent un nouveau concept de

mémoire magnétique, associant vitesses d'accès et densité d'information. Les mémoires de type « *race-track* » offrent un concept futuriste d'enregistrement en 3 dimensions.

Un domaine très prometteur est celui de l'effet magnéto-calorique qui exploite la variation d'entropie au voisinage d'une transition magnétique. Les efforts actuels concernent la recherche de matériaux plus performants et leur mise en forme, essentielle pour optimiser les échanges thermiques.

Une application potentielle de grand intérêt de la magnétoscience concerne l'effet d'un champ magnétique sur un processus métallurgique. En particulier, la microstructure d'alliages à base de fer peut être modifiée de façon contrôlée à travers l'augmentation de la température de transition ferrite-austénite induite par le champ.

- On l'aura compris, les propriétés des aimants dépendent massivement de leur état métallurgique. Or, une séparation dommageable subsiste entre physiciens du magnétisme et métallurgistes. Un effort très spécifique doit être entrepris dans ce domaine en sorte que ces deux communautés se rapprochent davantage et élaborent ensemble les aimants du futur.

7 | Travaux publics et construction

7.1 Enjeux

Les travaux publics constituent une part importante de l'activité économique. Une caractéristique de ce secteur est l'immense diversité des goûts et des habitudes culturelles qui limite l'extension des solutions techniques en dehors de la zone où elles ont été mises au point. D'où un important éclatement du marché et la nécessité d'un effort d'adaptation aux habitudes locales.

En dehors de quelques « majors », l'activité est répartie entre une multitude d'acteurs de petite ou moyenne dimension. Ce secteur qui a une image technique plutôt traditionnelle doit faire face à deux défis majeurs :

- l'immense demande des pays émergents en logements à coût modéré ;
- la contrainte climatique.

Le premier appelle surtout des innovations en dispositions constructives. Mais les pays émergents sont soumis à des catastrophes naturelles, tremblements de

terre, tsunamis, inondations, et les bâtiments doivent y résister, tout en restant bon marché. Face aux contraintes climatiques, la science des matériaux et la Métallurgie sont sollicitées : allègement des structures, amélioration de l'isolation, intégration des sources d'énergies renouvelables...

7.2 Apports de la Métallurgie

La construction n'utilise, comme métal, pratiquement que l'acier, l'aluminium intervenant pour des finitions (cadres de fenêtre...) et le cuivre dans les canalisations.

L'allègement des structures concerne surtout les grands ouvrages et les immeubles de grande hauteur. La tenue aux vents et aux tremblements de terre impose des ossatures acier, souvent associées au béton. Le développement d'aciers à haute résistance en très grande dimension a ainsi permis d'alléger de 25 % environ les structures. On citera aussi l'allègement des câbles de ponts ou de téléphériques, et la fabrication des palplanches servant à stabiliser les berges des rivières. Une usine du groupe ArcelorMittal, au Luxembourg, est la seule au monde à fabriquer ces palplanches en acier à haute résistance.



Figure 2.4
La tour de la Fédération à Moscou.

Un exemple de l'utilisation des poutrelles en acier à haute résistance, HISTAR® : la tour de la Fédération à Moscou (hauteur 340 m). L'emploi de cet acier a permis de diminuer de 25 à 30 % la quantité d'acier utilisé. Le développement de cet acier a été rendu possible grâce au nouveau procédé de traitement thermique « en ligne » de trempe et revenu (QST).

La recherche en matière d'isolation concerne surtout les associations de matériaux : ciments, isolants nouveaux, matériaux à changements de phase, etc. Les dispositions constructives sont ici l'élément essentiel pour pouvoir obtenir le meilleur de chaque matériau, permettre un montage facile pendant le chantier, tout en restant à coûts raisonnables. Il en va de même pour l'intégration des éléments actifs tels que les capteurs solaires. En termes de construction, la

difficulté réside surtout dans l'agencement optimal des différents éléments pour l'esthétique et la facilité de montage.

7.3 Position de la France

Pour des raisons historiques et culturelles, la France s'est spécialisée dans la pierre, la brique et le béton. Les métaux n'y ont qu'une place modérée (c'est aussi le cas du bois, sauf en montagne). L'image tenace de mauvaise tenue au feu des structures en acier lors de la catastrophe du CES Pailleron, il y a presque 40 ans, y est pour quelque chose. Depuis, des solutions fiables ont été développées mais l'image persiste. Ailleurs (Angleterre, Japon), on a fait des choix différents avec une forte participation du métal dans la construction. Les centres de production et de recherche sont donc plutôt à l'étranger : Angleterre, Finlande, Japon, Belgique et Luxembourg.

- Un effort de recherche et de développement tout particulier doit être fait pour améliorer cette situation. Ceci est d'autant plus vrai que la France dispose d'un centre de la construction métallique (CTICM) qui rassemble les compétences en la matière.

8 | Métaux et Défense

Les matériaux utilisés par la Défense sont soumis à des sollicitations extrêmes (chargement, vitesse de déformation, température) et doivent permettre des durées d'utilisation très longues (corrosion) (annexe 16). Le comportement d'un blindage soumis à un impact de projectile dépend de façon notable des caractéristiques dynamiques de l'impact lui-même et la compréhension des phénomènes aux grandes vitesses de déformation – en particulier changements de phase ou transformations internes – est encore imparfaite.

On ne saurait oublier la supériorité qu'a longtemps donnée, aux combattants, la maîtrise d'une bonne Métallurgie : que l'on songe seulement aux épées damasquées des Arabes au temps des croisades !

En France, Métallurgie et Défense ont une vieille histoire en commun, de recherche et d'innovations, en particulier au Laboratoire Central de la Marine où des progrès décisifs ont été réalisés, dans les années 1950, sur la technique du polissage électrolytique des métaux.

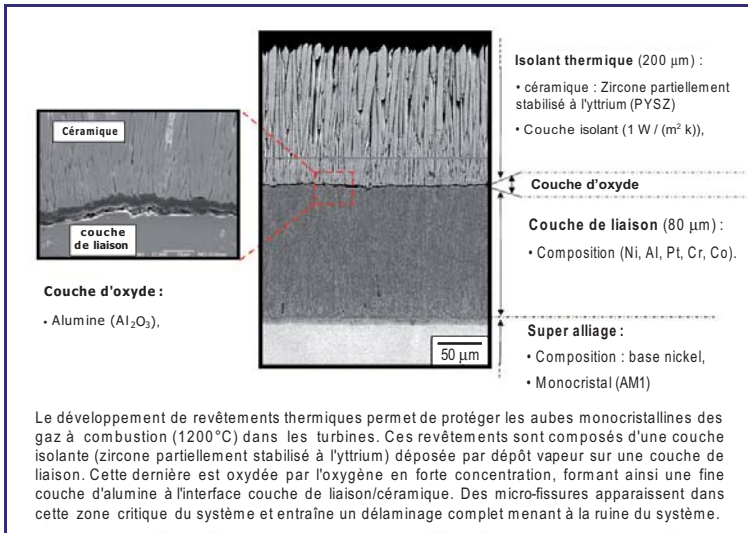


Figure 2.5

Aube monocristalline du moteur M88 de l'avion de combat Rafale. Les aubes sont isolées thermiquement à l'aide d'un dépôt de zircono [cf. figure 2.1, chapitre 2] (Thèse de Julien Frachon, ENSMP, 2009).

La Défense a besoin de matériaux métalliques aux propriétés supérieures à celles des applications civiles : tenue à températures élevées (matériaux moteurs, voir figure 2.5), caractéristiques mécaniques extrêmes (tenue à l'impact, perforation blindage), module élevé et très haute résistance, tenue à l'écrasement des coques de sous-marins, comportement à très long terme maîtrisé et garanti, en plus du problème de la sécurisation des sources d'approvisionnement.

L'effort de recherche soutenu par la Défense, et à maintenir, doit porter principalement dans les domaines suivants :

- amélioration des techniques de mise en œuvre (recherche d'une faible dispersion des caractéristiques, contrôle des microstructures, assemblage par soudage) ;
- renforcement de la tenue au vieillissement sur de très longues durées et dans des environnements très sévères (température, humidité) ;
- mise en place de nouvelles technologies de traitements de surface, respectant le règlement REACH⁶ ;
- meilleure connaissance du comportement dynamique des matériaux métalliques. Dans ce domaine, la DGA a fortement soutenu la création de

⁶REACH : Registration, Evaluation, Autorisation and Restriction of Chemicals.

l'association DYMAT⁷ il y a plus de vingt ans, et ne cesse de promouvoir l'intérêt de cette thématique auprès de la communauté scientifique concernée. Cet appui doit être maintenu, voire renforcé.

9 | Biomatériaux métalliques

On appelle biomatériaux « des matériaux non vivants utilisés dans un dispositif médical destiné à interagir avec les systèmes biologiques ». En contact avec la matière vivante (implants...), ils mettent en jeu la biocompatibilité et la bio-activité. Ce sont souvent des céramiques, des polymères, des matériaux d'origine naturelle mais nous n'évoquerons ici que le cas des métaux et alliages (annexe 17).

Parmi ces derniers, les plus utilisés actuellement sont :

- les aciers inoxydables 316L pour les *stents*^{*}, les vis et plaques de fixation, les valves... ;
- les alliages de titane (prothèses de hanche, vis, implants dentaires) présentant une excellente résistance à la corrosion, une faible densité, une bonne biocompatibilité (l'os adhère facilement au titane) mais une faible résistance à l'abrasion ;
- les alliages à mémoire de forme type nitinol, Ti-55 % Ni (*stents*, odontologie...);
- les alliages cobalt-chrome (odontologie, prothèses de hanche et de genou, valves cardiaques) présentant une grande résistance à l'usure.

Mais nombre de problèmes subsistent en particulier l'émission dans l'organisme d'ions métalliques (nickel, cobalt) classés cancérogènes, ou la création de débris par frottement.

Il convient donc de mettre au point de nouveaux alliages sans nickel ni cobalt, résistants à la corrosion et ayant de bonnes propriétés mécaniques (par exemple des aciers austénitiques sans nickel) ; d'autre part d'étudier des revêtements polymères ou céramiques – par exemple carbure de silicium, oxyde ou nitrure de titane, zircone, carbone pyrolytique... – conférant à l'alliage une bonne résistance à l'usure et à la corrosion et permettant de limiter les frottements. Nombre d'alliages sont actuellement étudiés : alliages de cobalt pour l'arthroplastie du genou, alliages de titane de faibles modules d'Young pour leur biocompatibilité mécanique avec les os...

⁷DYMAT : European association for the promotion of research into the dynamic behaviour of materials and its applications.

- Tout progrès en ce domaine suppose une multi-disciplinarité associant métallurgistes, céramistes, polyméristes, biologistes, stomatologues, chirurgiens... C'est ainsi que de nouveaux biomatériaux seront mis au point, pour atteindre des durées de vie supérieures, diminuer les risques post-opératoires, améliorer le confort des patients et pouvoir reconstituer des organes entiers. Un effort important doit être réalisé dans l'ensemble de ce domaine.

10 | Emballage

10.1 Enjeux

L'emballage constitue un marché important. Parmi les différents matériaux utilisés en France (chiffre d'affaires : 17,3 milliards d'euros en 2007), la part du métal représente 13 %⁸, parmi lesquels les boîtes de conserve 32 %, les boîtes boisson 15 % et le bouchage 13 % constituent l'essentiel⁹.

L'environnement et la sécurité pour les emballages alimentaires s'imposent de plus en plus. On doit donc se préoccuper :

- du recyclage des emballages, point favorable pour les métaux ;
- de leur contenu énergétique, donc en particulier de la masse ;
- de la protection du contenu, tout en se pliant aux exigences de l'esthétique et du marketing (annexe 18).

10.2 Métallurgie, protection et recyclage

L'acier et les alliages d'aluminium se partagent l'essentiel du marché de l'emballage métallique, la recherche se concentrant sur le secteur de l'agroalimentaire, où l'emballage rigide compte pour ≈ 70 %. Enjeux et applications sont à peu près les mêmes pour ces deux matériaux qui sont donc concurrents frontaux sur ce marché très disputé.

L'acier doit être recouvert d'un revêtement pour éviter le contact avec les aliments. La solution traditionnelle consiste à le recouvrir d'un film fin d'étain : c'est le « fer blanc ». Plus récemment a été développée la famille des « *tin-free steels* » (TFS) où l'on utilise notamment le titane, les boîtes étant en outre recouvertes d'un vernis. Le métal de base est un acier ferritique durci par du carbone.

⁸Plastique : 35 % ; papier-carton : 32 % ; verre : 11 % ; bois : 9 %.

⁹Source : SESSI (INSE), enquête annuelle de branche, 2007.

On s'oriente actuellement vers des techniques de refroidissements rapides. Pour l'aluminium, la couche d'alumine revêtue d'un vernis sert de protection et les alliages pour emballage rigide sont obtenus par corroyage au laminage d'alliages 3XXX (Al-Mn) et 5XXX (Al-Mg-Mn). Pour améliorer encore la protection des aliments, les recherches se poursuivent sur des revêtements par dépôt sous vide ou sur de nouveaux polymères.

Les capacités de recyclage sont bonnes pour les deux matériaux. L'acier est trié par magnétisme, l'étain du revêtement étant vaporisé lors de la refonte en four électrique et se retrouvant dans les poussières, objet de recherches poussées. Les boîtes en aluminium sont triées par courants de Foucault dans les centres de tri sélectif. Elles sont ensuite fondues en four à couverture de bain de sels fondus (four rotatif basculant), et recyclées dans la même filière. Ce procédé fait l'objet de travaux de R&D visant à maximiser le rendement et l'efficacité énergétique.

10.3 Résistance mécanique et mise en forme

Afin de diminuer les coûts et le contenu énergétique en CO₂, une course à l'amincissement est engagée. Aujourd'hui des épaisseurs de 80-100 μm sont courantes. La propreté en inclusions est cruciale pour la mise en forme par étirage du corps des boîtes boisson à des épaisseurs finales aussi faibles. De plus, la fabrication à haute cadence des boîtes doit être assurée sans grippage de la bande sur les bagues d'étirage. Dans le cas de l'alliage d'aluminium 3104-H19, un mécanisme d'autonettoyage de la bague, par les composés de phases intermétalliques au manganèse dispersés, le permet.

Les boîtes devant résister à la pression intérieure, notamment durant la stérilisation, ainsi qu'aux manipulations lors du stockage, il faut trouver des alliages plus résistants mais conservant la même facilité de mise en forme. Pour l'acier comme pour l'aluminium, le durcissement est obtenu en optimisant éléments d'addition et écrouissage, tout en conservant une bonne ductilité. Difficulté particulière : l'écrouissage induit une orientation préférentielle (texture) des grains, d'où une déformation inhomogène du métal (formation de « cornes » d'embouissage). Le compromis entre un taux de cornes acceptable et un durcissement suffisant est en continuelle amélioration. Sa maîtrise nécessite des modèles de comportement très précis.

L'aluminium est aussi utilisé dans divers emballages, semi-rigides (barquettes, tubes, opercules) ou souples, tels que les complexes multicouches pour briques associant feuille mince, jusqu'à 6 μm , en aluminium faiblement allié, polymère et carton. On doit alors optimiser les performances des feuilles en jouant sur les procédés (coulée continue ou semi-continue, laminage, traitements thermiques)

et la microstructure (distribution des particules intermétalliques, structure granulaire fine).

10.4 Position de la France

Le marché des bandes pour emballages rigides est essentiellement européen et concentré, avec de grands clients dont les lignes de remplissage sont proches des centres de productions des boissons ou aliments.

La France dispose de deux centres de recherche industriels de très bon niveau (déjà cités) à Voreppe pour les alliages d'aluminium et à Maizières-lès-Metz pour les aciers. Des équipes universitaires travaillent sur la maîtrise des séquences de précipitation dans l'acier, sur les textures, la mise en forme et l'élaboration, avec une compétence particulière en tribologie (Lyon et Sophia-Antipolis). Une forte présence d'universités européennes telles que celle d'Aix-la-Chapelle (RWTH¹⁰) sur ces sujets doit être soulignée.

Au total, le marché de l'emballage métallique pour l'agro-alimentaire (conserve, boisson) est important pour la Métallurgie française qui est leader dans la fourniture de laminés acier (ArcelorMittal) et aluminium (Alcan Tôles de Spécialités).

- En termes de recommandations s'impose ici le maintien d'une R&D de haut niveau scientifique et technique. Elle concerne tous les métiers (recyclage, élaboration, coulée, laminage, Métallurgie des produits, formage), en une approche globale cumulant les améliorations incrémentales à chaque stade de la fabrication des demi-produits et des emballages, et associant étroitement client et fournisseur. Elle vise à des améliorations continues des performances (réduction des épaisseurs) et des procédés (fonderie, laminage, formage). Les compétences des laboratoires français sont à préserver :
 - en métallurgie physique de la mise en forme (texture-anisotropie, endommagement) ;
 - en modélisation numérique des procédés de mise en forme (laminage, parachèvement), avec les mécaniciens ;
 - selon des approches multi-physiques, sur les procédés de recyclage (haute température) et sur la lubrification et la tribologie en laminage.

¹⁰RWTH : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule – Université technique de Rhénanie-Westphalie.

11 | Outillage

11.1 Contexte

Les outils donnent ou modifient la forme d'un objet. On les classe en outils fousseurs, outils de coupe, outils pour moules de fonderie de métaux, outils pour moulage de plastiques ou composites organiques, outils pour le moulage du verre, outils pour le formage en phase solide des métaux (forgeage, laminage, filage, extrusion).

L'ensemble des propriétés requises pour une application dépend des sollicitations mécaniques appliquées, de la température effective de travail à cœur et en surface, de l'agressivité mécanique (abrasion) et chimique (corrosion, oxydation) de l'environnement.

Les matériaux traditionnels comme les aciers à forte teneur en carbone, résistants à l'abrasion et utilisés à des températures modérées, restent répandus et leur production s'est déplacée vers les pays émergents. L'Europe conserve néanmoins une position importante pour les produits haut de gamme, à performances supérieures (durée de vie, précision dimensionnelle, qualité des surfaces) dans les pays suivants : Allemagne, Autriche, Suède et, dans une moindre mesure, Espagne, France, Italie. Les activités d'innovation respectent en gros la même géographie (annexe 19).

11.2 Thématiques d'innovation

Les objectifs d'innovation visent avant tout l'augmentation de la durée de vie de l'outil. Le critère économique retenu généralement est la part de l'outil dans le coût de la pièce produite. Il peut cependant être plus avantageux d'utiliser un outil peu cher et qu'on renouvelle souvent qu'un outil performant et cher !

La démarche d'innovation consiste à identifier et chiffrer les diverses formes d'agression de l'outil, à comprendre les mécanismes de dégradation et à les entraver ou les contrôler. Ils consistent en particulier en : l'usure ou l'érosion mécanique ; la fatigue thermique ; le fluage de certaines zones portées à hautes températures ; la fissuration, généralement située dans les zones fortement sollicitées. S'impose alors le découplage de la zone de surface et du substrat, conduisant soit à un mono- soit à un poly-matériau, typiquement un métal muni d'un revêtement dont l'épaisseur peut varier de quelques nanomètres à quelques millimètres.

Les outils de coupe constituent une famille à part, du fait de sollicitations très particulières. Parmi eux, dominant les outils en carbures (tungstène avec titane...) frittés par du cobalt, recouverts de dépôts multicouches céramiques (oxydes, nitrures...). Ce domaine est riche d'innovations, et des laboratoires français (CEA, Limoges, Nancy) ainsi que des groupes industriels (Balzers, Bodycote, H&F) y contribuent.

Les outils de formage à froid des métaux doivent combiner une haute dureté pour éviter l'enfoncement et une bonne résistance à l'abrasion. Les matériaux employés sont des aciers, dont certains, issus des procédés de la métallurgie des poudres. Les innovations résident dans la mise au point de dépôts pour augmenter la dureté et réduire le coefficient de frottement, et la définition de nouvelles nuances d'aciers relativement à des contraintes spécifiques (par exemple un milieu corrosif particulier). Notons, pour la tribologie, l'activité du CROMeP à l'École des mines d'Albi.

La technologie des moules pour les plastiques (températures modérées) est en constant progrès. Des moules nus en aciers inoxydables durs, pour des surfaces très lisses (CD-ROM) sont conçus dans l'Industrie (Japon, Suède, Autriche, France), tandis que les données spécifiques, telle l'abrasion-corrosion, sont mesurées et interprétées dans des laboratoires universitaires (Autriche, Italie...). Ici encore, les traitements de surface, anti-abrasion et anti-collage, ainsi que la mécanique des moules, sont matières à innovations. On s'oriente vers une nanostructuration des surfaces pour des propriétés particulières : mouillabilité, sensation tactile ou visuelle...

Ces aciers de travail à froid avec ou sans revêtement et résistant à l'abrasion trouvent aussi des applications dans l'industrie alimentaire (couteaux, malaxage..) avec des impératifs d'hygiène donc de résistance à la corrosion, et dans des secteurs tels que les vis billes, les dispositifs électromécaniques, les injecteurs de moteurs diesel, le matériel de chirurgie, ...

Les outils de travail à chaud pour la forge et le moulage d'alliages d'aluminium, de cuivre, de magnésium, ou de zinc (Zamak) posent des défis de portée considérable, vu par exemple la quantité de pièces aluminium ou magnésium montées dans les automobiles. Ils découlent de ce que, aux températures de service ($> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$), les surfaces subissent des chocs thermiques instantanés violents (flux thermique de 1 à 10 MW/m²) qui s'ajoutent aux efforts mécaniques. C'est alors la fatigue thermomécanique qui devient prépondérante, se combinant à l'oxydation-corrosion. Ces aciers à outils à chaud restent produits, pour le haut de gamme, en Europe et en particulier en France. Dans ce domaine, le CROMeP, à Albi, laboratoire de renommée internationale, a été précurseur dans deux domaines : l'approche de la fatigue thermique des outils selon la démarche suivie pour les matériaux de moteurs de l'aéronautique, et l'investigation multi-échelle

des structures, en collaboration avec le LLB (Saclay) et le GPM (Rouen), montrant l'existence et le rôle déterminant des carbures nanométriques. Parmi les multi-matériaux innovants, on citera les revêtements épais d'alliages de nickel ou cobalt gardant une dureté élevée à chaud (pour le forgeage), les dépôts minces de céramiques ou nitrures évitant le collage par diffusion et formation d'intermétalliques en fonderie de métaux.

Certaines applications nouvelles demandent des outillages de haute technologie, parmi lesquels le formage superplastique (SPF-DB) du titane, avec des outils stables et résistants à 925 °C, ou à dilatation contrôlée pour la fabrication de pièces composites carbone de grande taille et de grande précision pour l'aéronautique avec des moules « intelligents »...

- En résumé, le sujet est en réel développement et une recherche métallurgique active s'y déploie. Si nous voulons y conserver la place que nous y tenons, l'effort actuel doit être amplifié, en direction de nouveaux alliages massifs, de matériaux de traitements de surface, de techniques de production de ces matériaux, de techniques de dépôts et de description des comportements en service.

12 | Microélectronique

On se bornera ici à la microélectronique, une industrie emblématique des technologies de pointe, sans présenter, en dépit de leur importance, les domaines de l'optoélectronique, des micro-ondes et antennes, des nanodispositifs (capteurs et actionneurs, MEMS, etc.). Rappelons cependant l'exemple des condensateurs aluminium/alumine qui avaient posé de redoutables problèmes aux métallurgistes afin d'assurer l'état physique et microstructural de la couche d'alumine.

Les métaux et leurs alliages, en particulier intermétalliques, jouent, en microélectronique, un rôle fondamental pour :

- les interconnexions métalliques assurant le transport du courant ;
- la connectique et les techniques de brasage – notamment avec l'interdiction des brasures au plomb ;
- la juxtaposition de matériaux très différents qui impose la création de barrières de diffusion ;
- l'élimination de la chaleur due à la réduction d'échelle et aux fortes densités de courant concomitantes.

Un succès de la Métallurgie : les interconnexions en aluminium souffraient d'une rupture due à la formation de cavités résultant de l'électromigration (fortes densité de courant) des atomes qui engendre un flux de lacunes – une maladie qui bloqua un temps la production des supercalculateurs. Ce fut un métallurgiste qui résolut le problème dans les années 1970 grâce à une addition de cuivre qui, en ségrégeant aux joints de grains, bloquait une composante importante de la diffusion par électromigration.

De nombreuses questions fondamentales constituent des verrous scientifiques au développement de la technologie :

- les interconnexions de cuivre posent le risque de contamination du silicium par diffusion ;
- les contacts ohmiques par formation de siliciures métalliques reposent le problème de la diffusion réactive (germination sous fort gradient chimique, croissance séquentielle ou simultanée...);
- la miniaturisation des composants pose de nombreux problèmes métallurgiques :
 - microstructures et défauts liés à l'épitaxie,
 - compréhension des effets de confinement sur la plasticité des métaux (joints de grains, dislocations...),
 - présence de très forte contraintes mécaniques (mécanismes de création et de relaxation des contraintes internes et leurs conséquences sur l'endommagement),
 - évacuation de la chaleur (succès de composites à base matrice métallique),
 - et de façon plus exploratoire pour la prochaine génération, les mécanismes de croissance des *nanowhiskers** ;
- l'élaboration des matériaux métalliques (monocristaux, dépôts minces et multicouches,...) fait appel à des technologies variées dont plusieurs relèvent de la thermochimie métallurgique. Faut-il rappeler que l'élaboration de monocristaux de silicium par zone fondue a été inventée par un métallurgiste ?

Il en résulte un besoin accru de métallurgistes, aux compétences solides dans des domaines classique tels que la diffusion (diffusion sous champ électrique, sous contrainte mécanique, diffusion réactive, diffusion et percolation...), les transformations de phases, la stabilité thermodynamique à l'échelle nanoscopique, la

thermochimie des interfaces et la mécanique (plasticité, endommagement). Elles doivent être associées aux spécificités du domaine : confinement d'échelle, co-existence de matériaux très différents, présence de contraintes très importantes. Des compétences expérimentales, communes à la Métallurgie classique et à la microélectronique sont aussi rendues indispensables par la finesse des échelles visées. La course à la miniaturisation ne peut se poursuivre de façon réaliste et efficace qu'en accordant une importance centrale à ces questions de Métallurgie (annexe 20).

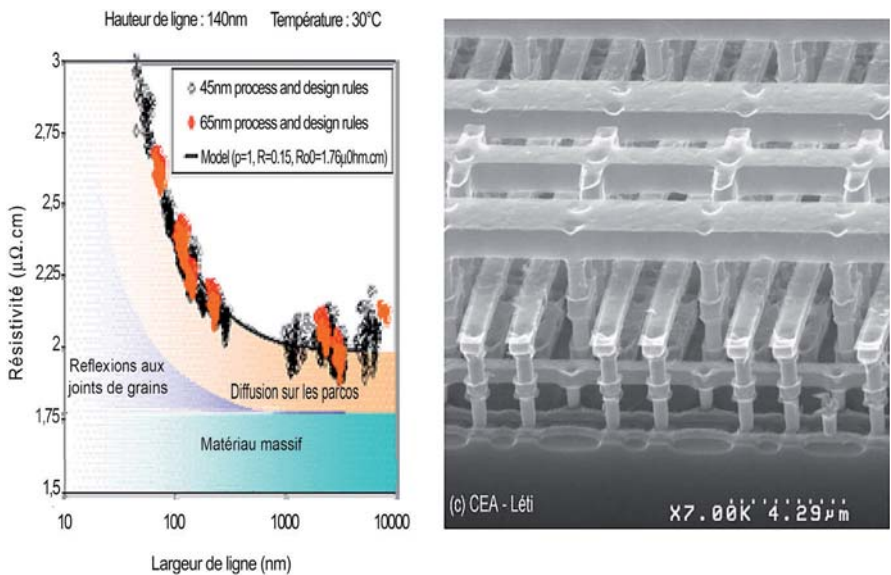


Figure 2.6
Résistivité des interconnexions de cuivre dans les circuits électroniques. Les interconnexions métalliques qui assurent le transport du courant sont actuellement en cuivre ultrapur. Tout défaut cristallin (joints de grains, dislocations...) contribue à augmenter sa résistivité. Il est donc impératif de recristalliser au mieux ces interconnexions. La faiblesse de leurs dimensions conduit à ce que les parois deviennent importantes dans la limitation du libre parcours moyen des électrons, mais aussi à des ancrages de joints aux interfaces en sorte que la résistivité du cuivre augmente quand la taille des canaux diminue. C'est une limitation majeure à la miniaturisation, les études actuelles sur le sujet s'appuyant sur les travaux classiques de recristallisation et de croissance des grains (Thèse V. Carreau, 2008, INPG).

13 | Industrie pétrolière

L'industrie pétrolière est grosse consommatrice d'acier, mais aussi d'autres métaux, à la fois dans le domaine de l'extraction et dans celui du transport. Dans ces deux cas, les seuls ici évoqués, elle a des exigences précises et pose aux métallurgistes des problèmes très spécifiques, souvent difficiles.

13.1 Corrosion liée au pétrole

Les tubes (tubage), têtes de puits, pompes... mettent en jeu des aciers, parfois des fontes (en différentes nuances), tous soumis à de fortes corrosions. Celles-ci sont principalement le fait de CO_2 et de H_2S (annexe 21).

13.1.1 Corrosion par CO_2

L'eau chargée en acide carbonique, donc en CO_2 , constitue un milieu corrosif pour les aciers (aciers au carbone, ou faiblement alliés) présents dans les équipements courants de production pétrolière¹¹. Différents types de corrosion sont classiques. La corrosion *généralisée* est une attaque de la surface conduisant à la formation d'une couche de carbonate de fer ayant un effet partiellement protecteur. La corrosion *par piqûre* apparaît dans des conditions de faible circulation et pour des températures proches du point de rosée de l'eau. La « *mesa attaque* » (annexe 21) apparaît lorsque se produit une instabilité lors de la formation de la couche de carbonate de fer. Enfin, la corrosion localisée *sous écoulement* apparaît lorsque des turbulences locales, associées à la croissance du dépôt de corrosion, entraînent son arrachement et l'impossibilité de reformer une couche adhérente et protectrice de carbonate.

Bien des paramètres jouent sur cette corrosion : la composition de l'eau (présence d'éléments basiques ou acides) qui joue un rôle essentiel sur la formation et la stabilité de la couche de carbonate ; la présence, la nature et la concentration des hydrocarbures associés à l'eau, ainsi que les conditions hydrodynamiques ; la température, mais aussi la composition, les traitements thermiques et l'état microstructural des aciers. Ainsi l'addition de 3 % de Cr dans l'acier divise par 10 la vitesse de corrosion, du fait de la formation d'un carbonate métallique plus protecteur. La présence de V, Ti, Mo, Si ou Cu est également bénéfique.

Divers remèdes permettent de lutter contre cette corrosion : injection d'inhibiteurs à base d'amine imidazoline ou, plus récemment, d'additifs biodégradables ; utilisation d'un acier inoxydable de composition choisie en fonction non de la pression partielle de CO_2 mais de la salinité de l'eau ; utilisation de divers revêtements (organiques, en acier inox, en alliages de nickel...).

¹¹Les unités de décarbonisation par solvants chimiques sont également concernées par cette corrosion, notamment les têtes de colonnes de régénération. Pour les unités de raffinage, les circuits des eaux de chaudière et de refroidissement y sont aussi sensibles.

13.1.2 Corrosion par H₂S

Gaz acide, H₂S est présent dans de nombreux champs pétroliers. En solution aqueuse sa corrosivité vis-à-vis des aciers (au carbone ou faiblement alliés) est proche de celle de CO₂. Mais s'y ajoute le fait que H₂S peut favoriser l'absorption d'hydrogène par les aciers et donc conduire à leur fragilisation. Les réactions de corrosion sont ici, pour l'essentiel, l'oxydation du fer et la réduction du proton ; le principal produit de corrosion est le sulfure de fer qui peut former un dépôt adhérent et protecteur en surface des aciers.

Lors de la réduction du proton, l'hydrogène peut suivre deux voies distinctes : réagir avec un autre atome d'hydrogène pour former une molécule H₂ en solution ; pénétrer dans le métal sous forme d'hydrogène absorbé, d'où risque de fragilisation, et donc de fissuration de l'acier.

Nombreuses sont les formes de fissuration des aciers en milieu H₂S. Citons-en deux, à titre d'exemples. Le SSC (*sulfide stress cracking*) est une fissuration du métal due à la corrosion et à la présence de contraintes mécaniques en présence d'eau et de H₂S. Ce type de défaillance se rencontre essentiellement pour les aciers à haute limite d'élasticité : tubage, cuvelage, lime de travail... Le HIC (*hydrogen induced cracking*) est une fissuration interne due à ce que l'hydrogène atomique diffuse dans l'acier et forme, sur des pièges (dislocations, joints...), de l'hydrogène moléculaire. Quant aux facteurs de risque de fissuration par H₂S, les principaux sont le pH du liquide, sa pression partielle en H₂S, sa teneur en chlorure et sa température.

L'industrie pétrolière fait appel à de nombreux matériaux métalliques (annexe 22). Dans la partie suivante, nous allons mettre l'accent sur les aciers au carbone qui, avec les canalisations de transport des produits bruts et raffinés, représentent une part considérable du marché.

13.2 Transport des hydrocarbures (pétrole et gaz)

On estime à plus d'un million de kilomètres la longueur des pipelines assurant la distribution du pétrole et du gaz dans le monde, soit sensiblement 25 fois le tour de la Terre. Les canalisations correspondantes ont des diamètres allant de 10 cm environ jusqu'à 1,5 m. Elles supportent des pressions allant de quelques bars jusqu'à 200 bars (gazoducs au fond de la mer du Nord). Il s'agit d'un domaine d'activité considérable. Rappelons qu'au niveau européen, 85 % du pétrole est importé. Les conséquences d'un accident sur un pipeline peuvent être dramatiques, comme le rappelle l'accident récent du 7 août 2009 qui s'est produit à Saint-Martin du Crau (annexe 23).

Pour répondre aux demandes croissantes en approvisionnement en pétrole des divers pays (1965 : $830 \cdot 10^6 \text{ m}^3$; 1980 : $26\,000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$; 2000 : $52\,000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), les métallurgistes ont trouvé des solutions en assurant une augmentation de la pression de service (66 bar en 1965 ; 120 bar en 2000) grâce au recours à de nouvelles nuances d'aciers à haute résistance et en développant des tubes de plus grand diamètre (1965 : 900 mm ; 2000 : 1 620 mm). Alors que dans les années 1960-1970, les alliages utilisés étaient des aciers au carbone-manganèse (avec de légères additions en Nb et Ti) permettant d'atteindre des résistances de l'ordre de 350 MPa, les aciers à très haute résistance (600 à 700 MPa) ont été développés à la fin du siècle dernier grâce à la mise en place des traitements thermomécaniques contrôlés (TMCP¹²) et à des modifications de composition. On parle maintenant, surtout au Japon, de l'introduction d'aciers, toujours aussi soudables, à 850 MPa (nuance X 120). Ces aciers modernes ont ainsi une structure ferrite-bainite ou pleinement bainitique.

En Europe, deux sociétés industrielles franco-allemandes, implantées en France, jouent un rôle primordial : Vallourec Mannesmann pour la fabrication des tubes sans soudure et Europipe pour les tubes roulés-soudés.

Les caractéristiques demandées à ces pipelines sont de plus en plus contraignantes : résistance mécanique, absence de fragilité, tenue à la corrosion. Grâce à ces caractéristiques, le transport par pipeline reste très sûr. En Europe, en 1971, nous disposions d'un réseau de pipelines pour le transport du pétrole s'étendant sur près de 13 000 km, on notait en moyenne 1,2 fuite¹³/an pour 1 000 km. En 2000, les pipelines pour le transport de pétrole ont une longueur de plus de 30 000 km, et le taux de fuite est descendu à 0,2/1 000 km/an, ce qui représente une amélioration très sensible. Ces progrès ont pu être obtenus grâce à une meilleure exploitation des installations, à l'introduction de nouvelles nuances d'acier et au développement de méthodes récentes permettant d'assurer une meilleure prévention des risques de rupture (annexe 23).

Le marché des matériaux métalliques, notamment les aciers pour l'industrie pétrolière, représente un enjeu technique et économique de premier ordre.

- Face à la concurrence, notamment japonaise, il est nécessaire de renforcer les recherches effectuées en France. Celles-ci doivent, en particulier, être orientées vers la maîtrise du soudage et l'évaluation de la nocivité des défauts afin de maîtriser parfaitement les défaillances mécaniques d'installations qui, pour certaines, ont une cinquantaine d'années.

¹²TMCP : *thermomechanical controlled process*.

¹³En Europe, une fuite est définie comme étant une perte supérieure à 1 m^3 .

CHAPITRE **3**

La Métallurgie : recherche et enseignement

Vj k' r ci g' l p v g p v k p p c m { ' i g h v ' d i e p m

1 | La recherche en Métallurgie

Redisons-le : la recherche – académique et industrielle – a donné à la Métallurgie française, au cours du siècle passé, un remarquable essor. En grand nombre, des savants et des ingénieurs d’horizons variés ont illustré, dans notre pays, une école mondialement reconnue, qui a accompagné un développement industriel brillant, dans tous les domaines évoqués au chapitre précédent. Parmi eux, citons la sidérurgie (Sidelor/Arcelor), les alliages légers (Pechiney), les aciers spéciaux (Imphy, Ugine, Aubert & Duval), la mise en forme (Pont-à-Mousson, Vallourec, Metafram...), la construction navale (Chantiers de l’Atlantique), automobile (Peugeot SA, Renault) et ferroviaire (Alstom), l’énergie nucléaire (CEA, Framatome/Areva)... On en trouvera un tableau beaucoup plus complet en annexe 1.

On a vu (chapitre 2) que si certains de ces développements demeurent vivants, d’autres s’essoufflent et d’autres risquent de disparaître. Des départs en retraite massifs dégarnissent les laboratoires et effacent des compétences¹. Il est impérieux, dans ce contexte, que l’effort de recherche en Métallurgie soit au minimum maintenu, et bien souvent accru, accompagnant la revitalisation d’un enseignement qui soit moderne, concret et incitatif.

1.1 L’organisation de la recherche publique...

À l’Université, comme au CNRS, la recherche est organisée en compétences disciplinaires ce qui, en soi, est une bonne chose. Mais si elles ont su s’enrichir de disciplines modernes, comme l’informatique, on en est largement resté, pour les disciplines classiques, à Auguste Comte. La Métallurgie, sur la triple frontière entre physique, chimie et mécanique, et sur la double entre recherche fondamentale et science de l’ingénieur, est mal à l’aise dans ce carcan. En particulier, les chercheurs-métallurgistes sont évalués en trois commissions du CNRS et trois sections du CNU, accentuant des différences qu’au contraire il faudrait effacer. Il en résulte, bien sûr, une faible visibilité pour une discipline à ce point émiétée.

1.2 ...et ses conséquences

Lorsque la structuration sur le long terme est de nature disciplinaire, les financements sur programme tendent de plus en plus à se construire en réponse à

¹... ce qui n’est qu’un aspect des problèmes posés à notre recherche. On lira en particulier : J. Friedel, *Quelles politiques de recherche ? Modes de financement et acteurs*, *La revue internationale et stratégique*, 55, 61, 2004.

des exigences sociétales : on voit se succéder les priorités au transport, aux microtechnologies, aujourd'hui à l'énergie, demain au biomédical, après-demain peut-être au bâtiment.

S'il est compréhensible que les affichages reflètent en partie les préoccupations économiques et sociales, il en résulte toutefois que la Métallurgie (la science des matériaux aussi) ne peut émarger à ces financements que comme discipline ancillaire : la « Métallurgie pour... ». Certes sa richesse et sa variété la rendent capable de participer à tous ces programmes, mais comme elle n'est jamais au cœur d'aucun, on court le risque de négliger la construction de compétences de fond (en thermodynamique et cinétique, en Métallurgie mécanique, en transformations microstructurales, en physicochimie de la corrosion...) au profit de réponses conjoncturelles à des appels d'offre où elle ne fait que suivre.

1.3 Le CEA, l'Onera, l'Irsid...

Le mal fut moindre dans des organismes à vocation dédiée, comme le CEA, l'Onera ou l'Irsid² où la Métallurgie s'est trouvée individualisée en tant que telle et reliée, par construction, aux unités chargées de la conception des ouvrages. Ainsi pouvait-on trouver, au CEA par exemple, des Départements de Métallurgie dédiés l'un aux réacteurs à neutrons rapides, l'autre à la filière électrogène, où recherche fondamentale et recherche quasi-industrielle coexistaient de manière assez harmonieuse.

Cette coexistence ne pouvait bien sûr que favoriser les recherches transdisciplinaires. Ainsi, le CEA a joué là un rôle moteur en lançant, dans les années 1960, avec l'Irsid, des Écoles d'été dont un des buts était de surmonter les frontières entre chimie, physique et mécanique. Sur ce point l'objectif (ne) fut (qu') en partie atteint ; au moins avait-on créé, parmi les métallurgistes, une forme de communauté. Il faut noter que la plus grande part de cette communauté a désormais rejoint les bataillons des retraités, et que le nombre de chercheurs en Métallurgie a dangereusement décliné au CEA comme à l'Onera (cf. introduction).

1.4 ... et le monde industriel

Après des siècles d'un empirisme souvent fécond mais hasardeux, les entreprises métallurgiques ont pris conscience, au XIX^e siècle, de la nécessité d'un contrôle des fabrications, d'où a découlé l'idée de recherche : en effet, dans

²CEA : Commissariat à l'énergie atomique ; Irsid : Institut de recherche de la sidérurgie ; Onera : Office national d'études et de recherches aérospatiales.

les usines, les équipes travaillant à un contrôle essentiellement aval (composition chimique, dureté,...) se sont mises à rétroagir vers l'amont en vue d'améliorer les produits : l'idée de recherche était en germe et, dans les grands groupes métallurgiques, elle allait – parallèlement aux grands laboratoires américains (IBM, Bell, US Steel, GE, Unilever...) ou non (Philips, Siemens...) – donner naissance à des laboratoires de recherche d'envergure (annexe 24). Ceux-ci ont longtemps joué un rôle actif dans la création des idées et des techniques fondamentales de la Métallurgie : on pensera par exemple à l'action décisive de l'Irsid, ainsi que de l'Onera, dans le développement de la microsonde électronique (Castaing...).

Ainsi en se limitant aux deux « Grands » de la Métallurgie, on citera ici le laboratoire ArcelorMittal Research, principal potentiel de recherche acier européen, à Maizières-les-Metz (naguère Irsid), qui emploie près de 600 personnes avec un chiffre d'affaires en 2008 de 83,2 M€, et le centre de recherches de Rio Tinto Alcan (naguère Pechiney) à Voreppe qui emploie environ 200 ingénieurs et techniciens.

En regard, on se reportera à la décroissance des nombres de chercheurs métallurgistes au CEA « civil » et à l'Onera qui, en chiffres ronds, souffre d'une réduction de moitié sur les deux dernières décennies (cf. introduction).

Autre source d'inquiétude : les dépenses de R&D qui, dans le domaine de l'ensemble de la recherche industrielle en Métallurgie, étaient de 368 M€ en 2007 sont stables depuis 1999 (en € courants), ce qui se traduit par une baisse en volume de 25 % (par calcul en € constants sur 15 ans). La part de la dépense intérieure de R&D (DIRD) des entreprises du secteur de la Métallurgie par rapport à celle de l'ensemble de l'économie française a ainsi gravement baissé de 40 % entre 1992 et 2007, passant de 2,0 % à 1,2 %. Ces chiffres traduisent la diminution relative de l'activité de R&D industrielle dans les métiers de la Métallurgie. Pour plus de détails, se reporter à l'annexe 24.

La situation détaillée de l'ensemble de la recherche industrielle en Métallurgie fait l'objet de l'annexe 24. Cette analyse permet de dégager un certain nombre de faits marquants. On en retiendra ici trois qui paraissent particulièrement importants :

- La R&D sur les procédés doit être encouragée et doit bénéficier davantage des contributions amont des laboratoires publics, notamment en modélisation et génie des procédés métallurgiques. Compte tenu de la situation de faiblesse du paysage universitaire français dans ce domaine d'activité, cet encouragement passe, sans doute, par l'organisation de l'accueil ou du détachement temporaire de chercheurs universitaires sur les sites de R&D industriels.

- Au niveau des effectifs, on estime à ~1 100 le nombre de chercheurs métallurgistes. Le nombre annuel de jeunes métallurgistes recrutés en R&D par l'ensemble des entreprises des divers métiers de la métallurgie devrait être proche de 150 si on souhaite maintenir le même niveau d'activité.
- L'internationalisation des entreprises métallurgiques encourage vivement l'accueil, dans les écoles, les universités et les laboratoires français, d'étudiants étrangers métallurgistes, notamment ceux originaires des pays d'implantation des sites industriels actifs en R&D en France, comme ceci est fait, en particulier, en Allemagne (par exemple, RWTH à Aix-la-Chapelle). L'origine de ces étudiants dépend beaucoup des secteurs industriels.

1.5 Nécessité d'une adaptation d'impédance

Force est de constater une évolution profonde de l'organisation qui vient d'être décrite à grands traits. Tout d'abord, s'il subsiste dans les Centres de recherche industriels des activités d'innovation et de veille scientifique de base, ainsi que quelques travaux de recherche fondamentale (en relation avec des équipes universitaires), la recherche qui y est menée est beaucoup plus directement finalisée. Le CEA et l'Onera sont parmi les rares organismes qui ont conservé en partie une dualité fondamental/appliqué.

Devant cette situation, un fait d'expérience s'impose : l'industrie ne peut pas sous-traiter intégralement la « Métallurgie académique » nécessaire aux applications industrielles. Il est indispensable qu'existe en interne, au Centre de recherche industriel, la culture scientifique correspondante, faute de quoi les collaborations universitaires ne porteront pas pleinement leurs fruits. Pas plus ne peut-on s'improviser, en milieu universitaire, porteurs de questions industrielles pertinentes. D'où la nécessité d'une interaction étroite pour que cette « importation de problèmes » soit fructueuse dans les deux sens.

Les recommandations qui suivent – qu'il faut entendre dans un contexte européen – ont pour objectif de stimuler ces fertilisations croisées. Elles doivent, à coût modéré, amener à ce que les ingénieurs de recherche de l'industrie portant les projets les plus « amont » passent une partie significative de leur temps dans un environnement universitaire, et que les chercheurs des organismes publics fassent de même dans l'autre sens, dans les deux cas sans préjudice pour la carrière des personnels concernés. Il faut pour cela :

1. encourager, chez les universitaires, les périodes sabbatiques passées en milieu industriel ;

2. symétriquement, encourager, chez les cadres de l'industrie métallurgique, les séjours en laboratoires de recherche, par exemple à l'occasion d'une promotion³ ;
3. mettre en place des postes similaires à ceux des *Adjunct Professors* des universités anglo-saxonnes pour les ingénieurs experts ;
4. mettre en place des chaires industrielles en universités ou en écoles (cf. recommandation 8) ;
5. encourager les activités de consultance pour les chercheurs des organismes publics.

Afin, plus généralement, d'améliorer la vitalité, l'efficacité et la visibilité de la recherche en Métallurgie dans les milieux, universitaire et industriel, nous proposons :

6. que soit mise en place, très rapidement, une « *Mission interministérielle* » (ci-après : MI), présidée par une personnalité désignée conjointement par les ministères de la Recherche, de l'Industrie et de l'Éducation nationale (ou par ceux en faisant fonction). Cette Mission sera composée à parts égales d'universitaires et d'industriels, nommés par ces deux ministères sur propositions des deux Académies (sciences et technologies), et pour moitiés de membres français et de membres étrangers. La moitié au moins de ces derniers seront européens. À titre indicatif, la composition de la MI pourrait être de 16 personnalités (8 industrielles et 8 universitaires), parmi lesquelles 8 seraient étrangères, dont 4 – au moins – européennes.
7. Que cette Mission, mise en place pour une durée de 3 ans, dessine les grandes lignes d'une recherche concertée (universités/organismes/industrie) en Métallurgie dans notre pays et qu'elle en propose les thèmes prioritaires aux ministères concernés ; notamment sur :
 - *La formation en recherche* : mesures relatives aux points 2.-5. ci-dessus, marquées en particulier par la création des « Pôles » résumée au point 8. ci-après.
 - *Les entreprises de taille moyenne* : liens à créer entre elles et le milieu de la recherche (Centre technique, « Plate-forme » de Métallurgie ? ...), en particulier *via* les laboratoires locaux.
 - *Le maintien en France* d'une partie substantielle de la recherche industrielle, en lien fort avec la recherche européenne.

³On songe ici aux nombreux séjours sabbatiques effectués, dans les décennies récentes, par des cadres de la Bell, d'IBM, de GE ou de Philips dans des laboratoires universitaires français comme celui de Physique des solides à Orsay.

8. Que soient individualisés, par la MI, quelques (de 2 à 4) *Pôles Enseignement-recherche* de Métallurgie (possiblement « Instituts de Métallurgie »), créés comme tels pour 5 ans renouvelables, et dotés de moyens (personnel et équipement) substantiels. Ces Pôles regrouperont des équipes universitaires, et/ou industrielles, et/ou issues des grands organismes, la configuration idéale étant celle qui comprend ces trois composantes, non forcément toutes sur le même site. Ils seront désignés par la Mission, après examen des réponses à un appel d'offre émanant d'elle. Ils mèneront des activités de recherche et d'enseignement (cf. § 2).
9. Que les moyens soient attribués à ces Pôles sous forme de contrats, de durée déterminée, sur des thèmes émanant pour moitié des recommandations précédentes et pour moitié des Pôles eux-mêmes.
10. Que la R&D en Métallurgie soit soutenue par affichage dans les programmes aidés (ANR, FUI), par l'identification des verrous scientifiques dans des domaines clés (protection/corrosion, durabilité, comportement en service, allègement et formabilité, assemblages innovants et multimatériaux, etc.). Et, dans les programmes de recherche par une forte incitation des études orientées vers l'intégration des procédés, au sens large du terme, et un renouveau de la recherche fondamentale.

2 | Enseignement de la Métallurgie

Enseigner la Métallurgie – ce qui s'est fait de longue date⁴ – c'est enseigner une des matières les plus ouvertes qui soient : un « alliage », au sens propre, de physique, de chimie, de thermodynamique, de mécanique, d'informatique, sans oublier bien sûr ces sciences des arts et des métiers qui sont celles de l'ingénieur. C'est dire que cet enseignement est à la fois difficile et passionnant.

C'est à l'ingénieur en question, mais aussi à des chercheurs, à des techniciens, qu'ont été adressés nombre des cours de Métallurgie du récent passé, à différents niveaux, dans nos grandes écoles, nos universités, nos IUT, notre Cnam... ; à l'étranger, dans les Départements de *Materials Science and Engineering* (MSE)⁵.

⁴Se rappeler ici les noms de Biringuccio (*De la Pirotechnia*, 1540) et d'Agricola (*De re metallurgica*, 1556). Ces deux ouvrages ont été traduits en anglais et en français.

⁵Rien n'empêche cependant de mentionner les métaux et les alliages bien plus tôt dans la scolarité. Ainsi, en classe de 6^e où le programme porte sur *la matière*, les métaux fournissent déjà d'excellents prétextes pour définir quelques notions simples d'élasticité, de plasticité, ou de corrélation entre conductions électrique et thermique.

Mais créer un cours de Métallurgie suppose que l'on se soit interrogé sur : 1/ Pourquoi et à qui enseigner la Métallurgie ? 2/ Quoi enseigner ? et 3/ Comment le faire ? Ces questions (et des réponses) sont présentées en annexe 25, où l'on propose aussi un état des lieux, en France et dans quelques pays étrangers (Japon, Royaume-Uni, Suisse, États-Unis, Allemagne et Corée), ainsi que des recommandations.

Cet état des lieux fait apparaître, à partir d'enquêtes écrites :

- dans les pays mentionnés, l'existence d'un enseignement de Métallurgie, en général dans les cursus de MSE – et d'un nombre d'étudiants en déclin mais encore suffisant. Il va cependant s'y poser un problème de renouvellement lié à l'âge moyen du corps enseignant et au nombre décroissant de jeunes chercheurs et enseignants porteurs de la discipline ;
- en France, une situation nettement plus inquiétante. Un enseignement subsiste, de qualité, ici où là, mais il a quasiment disparu – au profit de la gestion et des finances – dans la plupart des grandes écoles (voir p.). Même là où il subsiste, se profile le même problème de renouvellement qu'à l'étranger, et donc une perspective sombre. Leur positive, si encore réduite : on apprend avec plaisir la création récente (fin 2009), par Areva, de deux chaires industrielles, l'une de *Ingénierie nucléaire* aux Écoles chimie et Ensta (ParisTech), l'autre de *Matériaux du nucléaire* à l'École des mines (ParisTech).

Phrases relevées dans une enquête récente (2008) auprès d'enseignants (université/grandes écoles) : « La Métallurgie n'apparaît pas, aux étudiants, comme une matière scientifique de pointe ni comme un besoin pour la société » (Toulouse). « La Métallurgie n'attire plus les étudiants » (Poitiers). « L'image des matériaux est dépassée » (École centrale, Paris). « La Métallurgie, pour les étudiants, c'est du passé, c'est sale, ça sent mauvais, comme la chimie ou la mécanique » (Grenoble). « Le simple mot de Métallurgie fait peur » (Rouen).

Ajoutons que l'enseignement doit être, ici comme ailleurs, entendu au sens large du mot : le public, lui aussi, doit être enseigné. Ceci peut être fait au moins à deux niveaux : celui des *revues scientifiques* ou techniques de bon niveau (*La Recherche, Découvertes, Science et Vie...*) où il convient de proposer des articles sur des thèmes importants tels que la corrosion. Les nouveaux alliages, métaux et nucléaire, la fracture des métaux... ; et celui de la *grande presse* où des tribunes – notamment pour les pages « Débats » – devraient être envoyées, expliquant la place éminente que jouent, en termes d'innovation, d'économie et d'emploi, la recherche et l'industrie métallurgiques.

Face à une déjà préoccupante pénurie de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens métallurgistes et à un possible effacement de la Métallurgie dans nos universités, IUT et écoles d'ingénieurs, nous demandons avec force que, au niveau gouvernemental, un Plan d'urgence soit mis en place, sur propositions de la *Mission*, visant à revigorer – voire à reconstruire – l'enseignement de la Métallurgie en France. Ce plan devra prévoir :

- que les grandes écoles françaises forment des ingénieurs généralistes de haut niveau ayant reçu une formation solide à la fois en science et génie des matériaux et en génie industriel (systèmes de production) ;
- que – au moins dans les Pôles de Métallurgie (voir 8. ci-dessus) – soit créé ou revivifié (suivant les cas) dans les grandes écoles et les universités scientifiques un enseignement structuré de Métallurgie. Elle y figurera comme discipline scientifique moderne (cf. chapitre 1) mais aussi comme composante majeure de l'activité économique ;
- que soient remises en place :
 - des écoles d'été destinées à préparer des enseignants, pas tous métallurgistes de par leur activité de recherche, à être capables de délivrer à de jeunes chercheurs une formation moderne à cette discipline,
 - des formations ciblées – en liaison avec les secteurs industriels demandeurs (veiller au recrutement international adéquat) – s'adressant à des ingénieurs ou à des techniciens de ces différents secteurs ;
- que la Métallurgie soit très présente dans la voie professionnelle du lycée, aux niveaux du CAP et du Baccalauréat, puis de la licence professionnelle. Ce point primordial doit s'insérer dans une nécessaire rénovation de l'enseignement professionnel, lequel fait actuellement l'objet d'une étude globale de l'Académie des technologies.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages et rapports généraux

- Adda Y., Dupouy JM., Philibert J. et Quéré Y. (1987). *Éléments de Métallurgie physique* (6 tomes). Ed. INSIN.
- Bathias C. et Pineau A. (2009). *La fatigue des matériaux et des structures*. Tomes I, II, III, IV. Hermès-Lavoisier.
- Cazaud R., Pomey G., Rabbe P. et Janssen Ch. (1969). *La fatigue des métaux*. Dunod, Paris.
- Chalmers B. (1963). *Métallurgie physique*. Dunod, Paris.
- Chevalier JP. (2007). Nouveaux vieux matériaux et les enjeux du XXI^e siècle : développement durable, énergie et CO₂. Cnam.
- Dieter G. (1988). *Mechanical metallurgy*. McGraw Hill.
- Dorlot JM., Bailon JP. et Masounave J. (1986). *Des matériaux*. 2^e édition revue et augmentée. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
- Friedel J. (1964). *Les dislocations*. Gauthier-Villars.
- Friedel J., Philibert J., Plateau J. et Pomey G. (2009). *L'œuvre scientifique de Charles Crussard*. Mines Paris.
- Guinier A. et Julien. R. (1987). *La matière à l'état solide*. Hachette.
- Hirth JP. et Lothe J. (1968). *Theory of dislocations*. McGraw-Hill, New York.
- Huntz-Aubriot AM. et Pieraggi B. (2003). *Oxydation des matériaux métalliques*. Hermès-Lavoisier
- Janot C., Gerl M., Grilhé et Caisso J. (1973). *Propriétés électroniques des métaux et alliages*. Masson.
- Kléman M. (1977). *Points, lignes, parois*. Éditions de Physique.
- Kurz W. et Fisher DJ. (1986). *Fundamentals of solidification*. Trans. Tech. Publications, Switzerland.
- McClintock F. et Argon A. (1966). *Mechanical behaviour of materials*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Milne I., Ritchie RO. et Karihaloo B. (2003). *Comprehensive structural integrity*. Elsevier Pergamon.

- Nabarro FRN. (1967). *Theory of crystal dislocations*. Clarendon Press, Oxford.
- Nabarro FRN. (1979). *Dislocations in solids*. North Holland, Vol. 4.
- Nodal consultants (2004). *Atlas de l'innovation dans la Métallurgie et position de la France*. Ministère de l'Économie, des finances et de l'industrie.
- Philibert J. (1991). *Atom movements, diffusion and mass transport in solids*. Ed. Phys.
- Poirier JP. (1985). *Creep of crystals*. Cambridge Univ. Press.
- Priester L. (2006). *Les joints de grains*. De la théorie à l'ingénierie. EDP Sciences.
- Quéré Y. (1998). *Physics of materials*. Gordon & Breach.
- Salençon J. (2002, 2005, 2007). *Mécanique des milieux continus*. Les éditions de l'École polytechnique, tomes 1, 2 et 3.
- Suresh S. (1998). *Fatigue of materials*. 2nd edition, Cambridge University Press.
- Uhlig HH. (1971). *Corrosion and corrosion control*. 2nd edition, John Wiley & Sons.
- Vignes A. (2009). *Métallurgie extractive*. Vol. 1 : Bases thermodynamiques et cinétiques ; Vol. 2 : Transformations ; Vol. 3 : Opérations, procédés et filières d'élaboration. Lavoisier.

Autres ouvrages

- Blondeau R. (2001). *Métallurgie et mécanique du soudage*. Hermès-Lavoisier.
- Blondeau R. (2001). *Procédés et applications industrielles du soudage*. Hermès-Lavoisier.
- François D. (2009). *Essais mécaniques et lois de comportement*. Hermès-Lavoisier.
- Freund LB. et Suresh S. (2003). *Thin film materials*. Cambridge University Press.
- Galerie A. (2002). *Traitements de surfaces en phase vapeur*. Hermès-Lavoisier.
- Lemaignan C. (2003). *La rupture des matériaux*. EDP Sciences.
- Miannay DP. (1998). *Fracture mechanics*. Springer.
- Suery M. (2002). *Mise en forme des alliages métalliques à l'état semi-solide*. Hermès-Lavoisier.

Références spécifiques

chapitre 1

§ 1.

Cahn RW. et Haasen P. (1996). *Physical Metallurgy*. North Holland Publishing Compagny, vol.1 à 3.

Cottrell A. (1995). *Introduction to Metallurgy*. The institute of Metals.

Gerl P. et Issy JP. (1992). *Physique des Matériaux*. Presses Universitaires romandes.

Haasen P. (1996). *Physical Metallurgy*. Cambridge University Press.

Philibert J., Vignes A., Bréchet Y. et Combrade P. (2002). *Métallurgie, du minerai au matériau*. Dunod.

§ 2.

Allnatt AR. et Lilliard AB. (1993). *Atomic Transport in Solids*. Cambridge University Press.

Cottrell A. (1988). *Introduction to the modern theory of metals*. The Institute of Metals.

Flynn P. (1972). *Point defects and diffusion*. Clarendon, Oxford.

Friedel J. (1964). *Dislocations in solids*. Pergamon Press.

Philibert J. (1991). *Atoms movements*. EDP Sciences.

Nabarro FRN. *Dislocations in solids*, North Holland (14 volumes parus).

§ 3.

Besson J. (2004). *Local approach to fracture*. Presses de l'École des mines de Paris.

Bornert M., Bretheau T. et Gilormini P. (2001). *Homogénéisation en mécanique des matériaux*. Hermes.

Francois D., Pineau A. et Zaoui A. (1995). *Comportement Mécanique des matériaux*. Hermes, Vol.1 et 2.

McClintock F. et Argon A. (1966). *Mechanical behaviour of materials*. Addison-Wesley Publishing Company.

§ 4.

Cahn JW. (1998). Reflections on diffuse interfaces and spinodal decompositions, *In The Selected works of John W. Cahn*, edited by W. Craig Carter and William C. Johnson, TMS, Warrendale, PA, 1-8.

Christian JW. (2000). *The theory of phase transformations in metals and alloys*. Pergamon Press, vol. 1 and 2.

Gaskell D. (1995). *Introduction to the thermodynamics of Materials*. Taylor and Francis.

Hillert M. (1998). *Phase equilibria, Phase diagrams and Phase transformations*. Cambridge University Press.

Hillert M. (2006). *Thermodynamics and phase transformations, the selected works of Mats Hillert*. EDP Sciences.

Martin JW. et Doherty R. (1997). *Stability of Microstructures in metallic systems*. Cambridge University Press.

Porter D. et Easterling K. (1997). *Phase transformations in metals and alloys*. Chapman and Hall.

Rappaz M. et Danzig J. (2010). *Solidification*. EPFL Press.

§ 5.

Frenkel D. et Smith B. (2002). *Understanding Molecular simulation*. Academic Press.

Philips R. (2001). *Cristals, defects and microstructures, modelling across scales*. Cambridge University Press.

§ 6.

ArcelorMittal environment report 2007. ESTEP Sustainable Use of Resources.

Bender W., Klima R., Bodo Lungen H., Wuppermann CD. *Resource Efficiency in the Steel industry in Germany Status 2008 Part I : Potentials in Steel Production*, Steel Institute VDEh ; VDEh Institute for Applied Research (BFI) Shanghai, May 12 - 15.

Birat JP. *et al.* ULCOS program : a progress report in the Spring of 2008, 3rd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, 8-11 June 2008, Lulea, Sweden.

- Birat JP. Steel and CO₂ – the ULCOS Program, CCS and Mineral Carbonation using Steelmaking Slag, First International Slag Valorisation Symposium, 5-7 Apr 2009, Leuven, Belgium. ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/estep/docs/estep_resource_roadmap_jti_en.pdf
- Hisyamudin MNN., Yokoyama S. et Umemoto M. (2009). *Utilization of EAF Reducing Slag from Stainless Steelmaking Process as a Sorbent for CO₂*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 56. <http://www.waset.org/journals/waset/v56/v56-80.pdf>
- Jardy A. et Ablitzer D. (2009). *Mathematical modelling of superalloy remelting operations*. Materials Science and Technology, vol. 25, n° 2, pp. 163-169.
- Jönsson P., Jonsson L., Alexis J. and Bentell L. Focus on clean steel within jernkontoret's research – An overview. *Revue de Métallurgie, Cahiers d'Informations Techniques*. Volume 105, Issue 6, pp. 317-326.
- Lifeng Zhang, Transport Phenomena and CFD Application during Process Metallurgy, Sohn International Symposium, Advanced Processing of Metals and Materials, Volume 2 – Thermo and Physicochemical Principles, Edited by F. Kongoli and R.D. Reddy (TMS).
- Rubel H., Wörtler M., Schuler F. et Micha R. (2009). *Sustainable Steelmaking : Meeting Today's Challenges, Forging Tomorrow's Solutions*. Boston Consulting Group, <http://www.bcg.com/documents/file23237.pdf>

chapitre 2

§ 2.

Advances in Material Forming : Esaform 10 Years on. Francisco Chinesta, Elias Cueto – Springer, 2007.

Dieter G. (1988). *Mechanical metallurgy*. McGraw Hill.

Felder E. (2000). *Procédés de mise en forme – Introduction*. Les Techniques de l'Ingénieur, Vol MC1 n° M3000.

§ 3.1.

Duret N. (2003). *Titanium or damage tolerance applications on A 380, Ti 2003* Science and Technology Wiley – VCH. Edited by G. Lütjering and J. Albrecht, pp. 2667-2671.

Les composites dans l'aéronautique. *Air et Cosmos*, n° 2118 du 28 mars 2008.

Louvigné PF. Challenges for the development of titanium in France and in the European Industry Ti (2007) Science and Technology The Japan institute of metals 2007, Edited by M. Nimoni, S. Akiyama, M. Ikeda, M. Hagiwara, K. Mauyama, pp. 33-37.

de Monicault JM., Guédou JY., Belaygue P. et André V. (2007). Issues and progresses in manufacturing of turbo-engines titanium parts Ti 2007 Science and Technology The Japan institute of metals. Edited by M. Nimoni, S. Akiyama, M. Ikeda, M. Hagiwara, K. Mauyama, pp. 1301-1308.

Rendings KH. (2003). Titanium products at Airbus, Ti 2003 Science and Technology Wiley – VCH Edited by G. Lütjering and J. Albrecht, pp. 2659-2666.

Slattery K., Cotton J., Boyer R., Weber G. (2008). Titanium alloy development needs for commercial airframes 2nd SAIAS Symposium September 2008, Stellenbosch South Africa.

Yvon Millet. Timet. Communication personnelle.

§ 4.

École d'été (1993). Materials Under Irradiation. *Solid State Phenomena*, **30-31**.

Was G. (2007). *Fundamentals of Radiation Materials Science, Metals and alloys*. Springer.

§ 5.

Harnessing Materials for Energy. Numéro spécial du MRS Bulletin, V.S. Arunachalan, E.Fleisher ed., Avril 2008, 33, N° 4.

§ 6.

Jiles DC. (1990). *Introduction to magnetism and magnetic materials*. Chapman and Hall.

§ 7.

Jackson N. et Dühr R. (1988). *Civil engineering Materials*. McMillan.

Taylor GD. (1994). *Materials in construction*. Longman Scientific and Technical.

§ 9.

- Arntz *et al.* (2007). *Les polymères utilisés dans le domaine des biomatériaux*. L'actualité chimique, **310**, 20-31.
- Chevalier J. (2009). *Biocéramiques*. Science et Technologies Céramiques. EDP Sciences, Paris, 639-664.
- Combes C., Rey C. (2001). *Biocéramiques. Propriétés et applications des céramiques*. Ed. P. Boch, Hermes Science, Paris, 245-274.
- Frosch KH., Stürmer K. (2006). Metallic biomaterials in skeletal repair. *European Journal of Trauma*, **2**, 149-159.
- Lévesque J., Mantovani D. (2003). Les biomatériaux métalliques : de l'industrie à la salle d'opération. *Médecin du Québec*, **38**, 8, 91-93.
- Mani G. *et al.* (2007). Coronary stents : A materials perspective. *Biomaterials*, **28**, 1689-1710.
- Niinomi M. (2008). Metallic biomaterials. *J. Artif Organs*, **11**, 105-110.
- O'Brien B. et Carroll W. (2009). The evolution of cardiovascular stent materials and surfaces in response to clinical drivers : A review. *Acta Biomaterialia*, **5**, 945-958.
- Sedel L. et Janot C. (2004). *Biomatériaux*. Rapport CNRS-INSERM, 1-26.
- Williams DF. (1992). *Medical and dental materials*. Materials Science and Technology. VCH, Weinheim.
- Williams DF. (2003). Biomaterials and tissue engineering in reconstructive surgery. *Sadhana*, **28**, N° 3-4, 563-574.

§ 10.

- Hirsch J. (2006). *Virtual Fabrication of Aluminium Products*. Wiley-VCH.

§ 12.

- Freund B., Suresh S. (2003). *Thin film Materials*. Cambridge University Press.
- Ohring M. (1992). *The Materials Science of thin films*. Academic Press.
- Solymar L. et Walsh D. (2004). *Electrical Properties of Materials*. Oxford Univ. Press.

chapitre 3

§ 2.

Ashby MF., Shercliff H. et Cebon D. (2007). *Materials : engineering, science, processing and design*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 514 pp. [ISBN 005299229].

Ashby MF. et Jones DRH. (2008). *Matériaux ; 1, Propriétés, applications et conception*, 3^e éd., Dunod, Paris, 388 pp. [ISBN 005575709].

Ashby MF. et Jones DRH. (2008). *Matériaux ; 2, Microstructures, mise en œuvre et conception*. 3^e éd. Dunod, Paris, 464 pp. [ISBN 005577876].

Bach JF., Friedel J. et al. (1993). *Réflexions sur l'enseignement*. Flammarion.

Bailon JP., Dorlot JM. *Des Matériaux* 3^e éd., Presses Internationales Polytechnique, Montréal, 736 pp. + 1 CD-ROM. [ISBN 004928712].

Barralis J, Maeder G. (2005). *Métallurgie : élaboration, structures-propriétés, normalisation* (Précis), Nouvelle éd., Nathan, Paris, 231 pp. [ISBN 005221461].

Callister W. (2003). *Science et génie des matériaux* [cours, exercices corrigés et cd-rom], 5^e éd., (Sciences SUP. Sciences de l'ingénieur). Dunod, Paris, 781 pp. [ISBN 004690105].

E-Materials : <http://www.e-materials.ensiacet.fr>

EPSRC : voir :

<http://www.epsrc.ac.uk/AboutEPSRC/IntRevs/2008MaterialsIR/default.htm>

<http://www.epsrc.ac.uk/CMSWeb/Downloads/Calls/ChallEng2009.pdf>

Friedel J. (2004). Quelles politiques de recherche ? Modes de financement et acteurs. *La revue internationale et stratégique*, **55**, 61.

Mercier JP., Kurz W. et Zambelli G. (1999). *Traité des Matériaux Vol. 1 : Introduction à la Science des Matériaux* 3^e éd., Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 499 pp. [ISBN 005476982].

NAE/NAS : voir :

http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=12560&page=R1

Philibert J., Vignes P., Bréchet Y., Combrade P. (2002). *Métallurgie : du minéral au matériau : cours et exercices corrigés*/2^e éd, Sciences SUP. Sciences de l'ingénieur, Dunod, Paris, 1177 pp. [ISBN 004710056].

GLOSSAIRE

Acier

Le mot désigne très généralement un alliage à base de fer à quoi s'ajoute une teneur inférieure à $\approx 2\%$ (en poids) de carbone. Tous les aciers contiennent, en outre, bien d'autres éléments d'alliage (par exemple du nickel et du chrome pour la plupart des aciers inoxydables).

Aciers ODS

Aciers durcis par dispersion d'oxydes obtenue, le plus souvent, par mécanosynthèse (*ball-milling*). La plupart du temps il s'agit d'aciers ferritiques renfermant une forte teneur en chrome, les oxydes étant l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3).

Caisse en blanc

Dans la fabrication d'une voiture, la caisse en blanc se réfère à l'étape de l'élaboration dans laquelle l'ensemble des tôles métalliques ont été découpées, embouties et ajustées par des points de soudure.

Cascade

Lorsqu'une particule (par exemple un neutron) heurte un atome (en fait un noyau) d'un solide, l'atome heurté quitte généralement son site (du moins si l'énergie qu'il a reçue dépasse un certain seuil, soit quelques dizaines d'eV) et heurte alors un second atome qui en heurte un autre, etc., en sorte que toute une cascade de chocs, et le plus souvent de déplacements d'atomes, en résulte, au sein d'une région relativement réduite du solide.

Combustible

Dans un réacteur nucléaire, on appelle combustible le matériau, métallique ou non (souvent, oxyde d'uranium, UO_2), contenant les atomes subissant la fission nucléaire et, donc, fournissant l'énergie du réacteur. Malgré ce mot, il n'y a là aucune combustion au sens chimique habituel du terme.

Débit de dose

C'est la « dose » radioactive par unité de temps. Elle s'exprime en gray par seconde (Gy/s).

Le gray est l'énergie absorbée par un kilogramme de matière exposé à un rayonnement ionisant apportant une énergie de 1 joule : $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. NB : $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

Défaut cristallin

On désigne ainsi toute irrégularité dans l'empilement des atomes ou des molécules d'un cristal qui rompt la perfection cristalline.

Ductile-fragile (transition)

Les aciers de structure CC (aciers ferritiques) peuvent être fragiles quand ils sont testés à basse température et à grande vitesse, alors qu'ils sont ductiles à plus haute température. On définit ainsi une température de transition ductile-fragile qui est, le plus souvent, repérée à l'aide d'un essai de choc par flexion trois points, l'essai Charpy.

Écrouissage

On appelle ainsi ? d'un vieux mot des métiers ? l'action de durcir un métal en le déformant. Ainsi le forgeron a-t-il toujours su qu'il durcissait l'épée, tout en lui donnant sa forme, lorsqu'il la battait sur l'enclume. Ainsi durcie, elle était écrouie. On peut acheter, chez le quincaillier, du tube de cuivre « écroui » (en fait, brut de déformation, et dur), ou « recuit » et alors plus malléable.

Éléments finis

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter le comportement de certains systèmes physiques (mécaniques, acoustiques, etc.).

Ergol

Dans le domaine de l'aéronautique, un ergol est une substance homogène employée seule ou en association avec d'autres substances et destinée à fournir de l'énergie. Les ergols sont les produits utilisés dans un système propulsif à réaction. Ils sont constitués d'éléments oxydants et réducteurs. On assimile parfois ergols et propergols.

Fatigue

Les matériaux sont soumis à de la fatigue lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement de façon cyclique. Cette sollicitation peut engendrer un endommagement et une rupture au bout d'un certain nombre de cycles, N_R . Les résultats des essais sont habituellement représentés à l'aide d'une courbe σ (amplitude de contrainte) – N_R (courbe de Wöhler).

Fluage

À haute température, les matériaux soumis à une contrainte constante (expérience de fluage) se déforment progressivement au cours du temps. On dit qu'ils fluent. De façon générale, à haute température, le comportement mécanique des matériaux dépend du temps. On dit que, par opposition à ce qui se passe à basse température où ce comportement est plastique, à haute température le comportement est viscoplastique.

Fluage-revenu

Procédé utilisé essentiellement avec les alliages d'aluminium à durcissement structural qui permet de mettre en forme des composants (par exemple une aile d'avion) en faisant le revenu de durcissement sous chargement mécanique.

Fission

Processus par lequel un noyau lourd, instable, se casse en 2 (ou plus rarement en 3) fragments plus stables, dits fragments de fission. 2 ou 3 neutrons sont également émis lors de la fission. La majeure partie de l'énergie dégagée se retrouve sous forme d'énergie cinétique des fragments.

Friction-malaxage (soudage)

Procédé relativement récent datant du début des années 1990 qui permet d'assembler par soudage en phase solide, à l'aide d'un outillage qui, par friction et malaxage, produit une zone de liaison homogène entre deux composants, par exemple, deux tôles. Ce procédé est surtout utilisé pour l'assemblage des alliages d'aluminium, mais il peut également être employé pour les aciers, voire la réalisation de liaisons hétérogènes entre acier et aluminium.

Frittage

Lorsque de fines poudres (notamment d'un métal) sont agglomérées dans un moule (où on les presse) puis chauffées à une température où la diffusion atomique est rapide (bien inférieure à la température de fusion), les grains de la poudre se soudent l'un à l'autre et il en résulte une pièce solide ayant la forme du moule. C'est en ce procédé que consiste le frittage, qui permet d'obtenir des pièces à forme bien définie sans passer par la fusion du métal.

L'ensemble du procédé (préparation des poudres et frittage) constitue la *métallurgie des poudres*.

Fusion

La fusion (thermonucléaire) est le processus par lequel deux noyaux légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd. Elle dégage une forte énergie provenant de l'attraction entre nucléons due à l'interaction forte.

Gonflement

On appelle gonflement d'un matériau soumis à irradiation le changement de volume (très généralement une augmentation) qu'il subit. Celui-ci peut être dû, pour un élément combustible, à l'accumulation des produits de fission (en particulier les gaz Xe et Kr) et, pour un matériau de structure, à l'agglomération, en cavités, des lacunes formées par l'irradiation.

Hydroformage

Procédé de fabrication de pièces de faible épaisseur par déformation plastique. La forme finale de la pièce est obtenue à l'aide d'un moule appelé « matrice ». Contrairement au matriçage, on n'utilise pas de matrice complémentaire, celle-ci

est remplacée par un fluide sous haute pression qui contraint la pièce à prendre la forme de l’empreinte de la matrice.

Interstitiels

Un défaut interstitiel correspond à l’occupation, par un atome, d’un site cristallin normalement inoccupé.

Invar

Alliage (64 % de fer, 34 % de nickel) de composition telle que sa dilatation thermique, du moins dans un certain domaine de températures, est pratiquement nulle : il est « invariable » en volume. Invar est une marque déposée des Aciéries d’Imphy. Sa découverte a valu le Prix Nobel de physique (1920) au Suisse Charles-Édouard Guillaume qui cherchait, au Bureau des poids et mesures, à fabriquer un mètre-étalon insensible aux variations de température.

Lacune

Il n’est pas rare que, dans un solide cristallin, un site atomique soit vide de l’atome qui devrait l’occuper. Cette configuration s’appelle une lacune. La présence d’une lacune (a fortiori de plusieurs) favorise la diffusion atomique dans le solide puisqu’un atome voisin de la lacune peut y « sauter », celle-ci faisant alors le saut inverse et l’opération pouvant se reproduire, avec d’autres atomes, autant de fois qu’on le voudra.

Les lacunes peuvent être présentes intrinsèquement, c’est-à-dire à l’état d’équilibre (leur présence augmentant l’entropie de configuration) ou être créées de manière extrinsèque, par exemple par déplacement d’atomes lors de chocs d’irradiation (voir « cascade »).

Maclage

Processus cristallographique par lequel deux parties du cristal sont en position de symétrie l’une par rapport à l’autre.

Nano-whiskers

« Whiskers » de très faible diamètre (~ 20 nm). Les « whiskers » sont des objets (barbes) longs et de faible diamètre, monocristallins et pratiquement sans défauts cristallins, ce qui leur assure une très grande résistance mécanique.

Phenix

Réacteur nucléaire à neutrons rapides (RNR) situé à Marcoule, qui a démarré en 1974 avec une puissance de 250 MW. Utilisé actuellement pour étudier la transmutation des éléments radioactifs à longue vie.

Quasicristal

Empilement atomique ordonné mais non périodique dont les figures de diffraction sont cependant discrètes.

Découverte : D. Shechtman, D. Gratias *et al.*, Phys Rev Lett, p. 1951 (1984). Voir aussi : C. Janot, Quasicrystals, a primer, Oxford sc. Pub., 1994.

Résilience

En métallurgie, la résilience représente l'énergie qu'il faut dépenser pour rompre par déformation plastique et, le plus souvent, à grande vitesse, une éprouvette de flexion par choc trois points (voir aussi Ductile-fragile (transition)).

Stents

Dispositif en partie métallique, maillé et tubulaire, glissé dans une cavité naturelle du corps humain pour la maintenir ouverte. Il est essentiellement utilisé dans les artères au cours d'une angioplastie.

Surgénérateur

Réacteur nucléaire qui produit (du moins pendant un certain laps de temps) plus de matière fissile qu'il en consomme. Cette propriété vient de ce que certains des neutrons produits par la fission transforment des noyaux non fissiles en autant de noyaux fissiles (par exemple : un noyau d'uranium non fissile est transformé en un noyau de plutonium fissile).

Ténacité

En métallurgie, la ténacité est une grandeur qui permet de caractériser l'amorçage et la propagation d'une fissure dans un matériau métallique sous l'effet d'un chargement monotone croissant. Cette ténacité a la dimension d'une contrainte multipliée par la racine carrée de la longueur du défaut. Cette caractéristique revêt une grande importance pour le dimensionnement de certains composants, notamment aéronautiques, qui doivent être « tolérants au dommage », c'est-à-dire avoir une forte ténacité.

Textures cristallographiques

En cristallographie, la texture désigne une orientation préférentielle des cristallites (ou grains) d'un matériau polycristallin. Sous l'influence de divers facteurs (mode de croissance des cristaux, déformation plastique, etc.), les grains ne sont pas orientés de façon totalement aléatoire, mais préférentiellement selon une ou plusieurs directions particulières. On dit alors que le matériau possède une texture. Diverses méthodes sont utilisées pour mesurer cette texture. La plus répandue est la diffractométrie des rayons X (méthode globale), la plus récente est la microscopie électronique à balayage avec diffraction des électrons secondaires rétrodiffusés (EBSD).

Transmutation

Dans un réacteur nucléaire, les noyaux des matériaux présents peuvent être l'objet de réactions nucléaires (par exemple capture d'un neutron lent) et donc être modifiés : on dit qu'il y a transmutation. Celle-ci peut, suivant les cas, conserver la nature chimique de l'atome transmuté (ainsi d'une simple capture neutronique) ou la modifier, parfois radicalement (ainsi de la fission).

Vj k' r ci g' l p v g p v k p p c m { ' i g h v ' d i e p m

Groupe de lecture critique

Vj ku' r ci g' l' p v g p v k p p c m { ' i g h v' d i e p m

COMPOSITION DU GROUPE DE LECTURE CRITIQUE

Association française de mécanique (AFM)

Gérard MAEDER

Président

Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Philippe BOMPARD

Directeur scientifique adjoint Insis

Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

Jean-Louis

BOUTARD Conseiller scientifique
DEN/DISN

Conférence des présidents d'université (CPU)

Francis WAGNER

Directeur du Laboratoire d'étude des textures et application aux matériaux (LETAM)
– Université Paul Verlaine - Metz

Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services

Louis TRÉPIED

Chargé de mission à la sous-direction de l'industrie de santé, de la chimie et des nouveaux matériaux

European Aeronautic Defence and Space Company (EADS)

Dominique SCHUSTER

Responsable de l'équipe matériaux et procédés métalliques

Électricité de France – Centre d'expertise et d'inspection dans les domaines de la réalisation et de l'exploitation (EDF Ceidre)

Denis BUISINE

Directeur adjoint du Ceidre

COMMENTAIRE DE L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE MÉCANIQUE

Gérard Maeder
Président

1. La promotion de l'importance d'un domaine scientifique passe par la communication auprès des jeunes. Or, la meilleure diffusion se fait par les enseignants.

Il est indispensable de faire savoir :

- que la métallurgie est à la base de l'étude des matériaux en général, y compris les plus médiatiques comme les nanomatériaux ;
- que si l'industrie d'élaboration s'est beaucoup délocalisée, l'industrie de transformation est encore largement présente en France ;
- que les ingénieurs et les techniciens sont recherchés dans l'industrie métallurgique.

Pour ceci, il faut pouvoir diffuser auprès des enseignants de tous niveaux (du collège aux universités) des kits de communication adaptés au niveau concerné, donnant des exemples d'application des métaux et des métiers correspondants, et des chiffres liés à l'importance des secteurs économiques correspondants et du nombre d'emplois prévisibles dans les années qui viennent.

2. L'environnement étant un point clé du développement, il me semble que l'analyse de cycle de vie, l'éco-conception incluant l'éco-production, et le problème de choix des matériaux, sont les moyens actuels d'introduire la science des matériaux dans le cursus d'enseignement.
3. La transformation, l'assemblage, les traitements de surface des métaux sont des points clés de leur développement. L'enseignement correspondant ne peut se faire sans l'existence de moyens physiques présents dans des ateliers. La modélisation et la simulation de ces procédés ne peuvent se passer de l'expérimentation pour être efficaces et comprises par l'élève ou l'étudiant. En particulier, c'est le moyen de montrer toute l'influence des données d'entrée, telles les incertitudes sur ces données ou les lois de comportement.

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m { ' i g h v ' d n e p m

COMMENTAIRE DU CNRS

Philippe Bompard

Tout d'abord il faut signaler l'importance du travail d'équipe réalisé par les deux Académies (lié au dynamisme et à la capacité de mobilisation de ses auteurs) et l'intérêt du document, en particulier pour tout métallurgiste qui y reconnaîtra les nombreuses et difficiles évolutions du contexte de cette discipline. Les recommandations 1 à 5 sont en particulier tout à fait pertinentes.

La tonalité générale de la synthèse du rapport présente un caractère assez « défensif », qui est sans doute volontaire. Conjugée à une certaine absence de « ruptures technologiques fortes » observables en métallurgie (notion de progrès continu), cette tonalité défensive pourrait faire perdre une partie de l'impact recherché auprès des décideurs politiques. En effet ceux-ci sont amenés à arbitrer avec d'autres disciplines comme l'informatique, l'électronique, les sciences du vivant, ou même d'autres parties très actives de la science des matériaux (composites, matériaux à propriétés électroniques et optiques, approches nano...). Il serait peut-être souhaitable que cette synthèse inscrive la métallurgie dans une dynamique plus positive et mieux liée aux évolutions et priorités de la nation.

Le rapport considère que la part de la recherche publique en France est insuffisante, en particulier en métallurgie. Cependant c'est surtout la part de la **recherche privée** dans ce domaine qui est insuffisante, conséquence inéluctable de la désindustrialisation de la France dans ce domaine, et du départ progressif des centres de recherche et des centres de décision vers d'autres pays. C'est donc tout d'abord à travers une **politique de réindustrialisation** que les effets négatifs sur la recherche et les laboratoires de métallurgie, bien décrits dans le rapport, seront le mieux combattus.

Les **priorités du CNRS**, telles qu'elles sont affichées dans son Contrat Objectifs Moyens, s'inscrivent au cœur des priorités sociétales de la nation (vivant, environnement, énergie, information...). Il ne s'agit pas d'effets de mode, mais de priorités à long terme. Le CNRS ne considère donc pas la métallurgie (ni beaucoup d'autres disciplines) comme une priorité en soi, et doit faire une place légitime à des disciplines en émergence comme les sciences de l'information. Cependant, bien conscient de la place transversale qu'occupe la science des matériaux, le CNRS fait dans ce domaine un effort important en soutenant, depuis le début des années 1980, un **programme interdisciplinaire de recherche (PIR)** sur les matériaux, en pratique souvent métalliques. Ce programme est doté

d'un budget conséquent, et est piloté au niveau de l'ensemble des Instituts. Le comité de pilotage définit les axes de recherche du programme en s'appuyant fortement sur la demande et le partenariat des grandes entreprises et/ou des EPIC du domaine. Par ailleurs, on notera également que les **programmes ANR**, blanc ou thématiques, disposent d'un budget conséquent, et font également une part importante à la science des matériaux, et à la métallurgie.

Au CNRS, la métallurgie « classique » relève, comme l'indique le rapport, de plusieurs sections du Comité national : principalement la 15 (chimie), mais également la 05 (physique) la 09 (mécanique) et la 10 (procédés). Le rapport propose que l'ensemble des métallurgistes soient rassemblés dans une même section, pour favoriser les échanges entre eux. Cette idée peut être examinée, mais ses inconvénients potentiels sont importants : risque de formation d'un « pré carré » défensif, risque de domination à terme d'une seule « approche » de la métallurgie, risque de recrutement au profit d'une seule famille de laboratoires. Une autre possibilité pourrait être la création d'une section interdisciplinaire (CID) *ad hoc*, composée de membres déjà en exercice dans d'autres sections (comme c'est le cas pour la bio-informatique par exemple). Mais le nombre de postes ouverts au concours dans une CID est nécessairement limité, et l'effet de rejet des candidats « métallurgistes » par les sections classiques vers cette CID deviendrait alors un risque supplémentaire important.

Le rapport reproche à la recherche publique en métallurgie d'être loin de l'industrie. Cependant, les laboratoires associés au CNRS, relevant de la métallurgie (Insis et INSC essentiellement), ont une part largement majoritaire de leur budget de recherche (hors salaires) constituée de **contrats de recherche partenariale** bilatéraux avec des entreprises, et/ou de projets ANR obtenus sur des programmes thématiques ciblés, en partenariat avec des industriels (en moyenne de 60 à 70 %). Cette recherche publique est donc proche des préoccupations des entreprises et ce sont leurs problèmes concrets dont elle s'inspire pour sa recherche amont. C'est le « comprendre pour faire », motivé par les **défis technologiques** autant que par les enjeux de société. Mais là encore la métallurgie est trop peu visible de ces deux points de vue, en particulier dans les médias généraux et scientifiques, et donc peu visible des jeunes étudiants, des futurs thésards, et donc futurs chercheurs... Ce **déficit d'image** n'est pas un effet de mode, il est lié aux causes citées antérieurement et devra être pris en compte et corrigé sur la durée, aussi bien par les entreprises que par les laboratoires.

Une conséquence importante de la baisse de la demande industrielle de recherche partenariale en métallurgie, et de son manque de suivi, est la **diminution du nombre de laboratoires et de chercheurs publics qui s'y consacrent**, et leur concentration sur quelques laboratoires, en général historiques, du domaine. Cependant, même s'ils ont des difficultés, pour les raisons évoquées précédemment, à recruter des étudiants, ces laboratoires sont toujours d'excellente qualité,

et **sont toujours soutenus par le CNRS** (postes, bourses, crédits incitatifs sur programme). Produisant de nombreux jeunes docteurs métallurgistes en partenariat avec l'industrie (Cifre, contrats de recherche), ces laboratoires pourront servir, le moment venu, de germes à un redémarrage quantitatif de cette discipline. Il faut remarquer que la capacité nouvelle et croissante de la science des matériaux à **modéliser** numériquement et **prédire** quantitativement les microstructures et les propriétés par des approches multi-échelles très complexes, ouvre à cette discipline de grandes perspectives. C'est peut-être une révolution comparable à celle connue par la mécanique au début des années 1980, avec le calcul de structure par éléments finis, et ses évolutions vers la CAO et la conception intégrée.

Malgré le nombre d'emplois à pourvoir évalué par le rapport, les étudiants, mais aussi les **établissements d'enseignement**, co-tutelles de nos laboratoires CNRS, perçoivent une **faiblesse** des offres d'emplois de haut niveau en métallurgie et une diminution de la demande de recherche dans ce domaine. Le renouvellement des postes de chercheurs et d'IT au sein des laboratoires se trouve ainsi fréquemment en situation d'**arbitrage défavorable** avec des disciplines de l'ingénieur plus récentes et dynamiques comme les STIC, ou comme le génie industriel plus proche. Mais si les écoles d'ingénieurs en particulier, et leurs enseignants, qui ont de nombreux partenariats et chaires avec les entreprises, recevaient de la part des industriels métallurgistes un message significatif d'embauche et de partenariat de recherche sur la durée, il serait alors plus simple de préserver les formations, les postes et les laboratoires. On ne peut que constater un **écart de perception des besoins** entre responsables techniques des entreprises (pris en compte dans le rapport) et les **responsables RH** de ces mêmes entreprises. Cet écart devra être réduit, pour que la métallurgie regagne en intérêt et en audience auprès des étudiants et des établissements, au bénéfice de nos laboratoires.

Vj k' r ci g' l p v g p v k p p c m { ' i g h v ' d i e p m

COMMENTAIRE DU CEA

Jean-Louis Boutard

Après le premier chapitre de présentation de la Métallurgie comme science en liaison forte avec les applications, ce rapport établit un diagnostic de la situation pour divers secteurs industriels et pour la recherche et l'enseignement.

D'une manière générale il s'agit d'un rapport bien documenté, dont la lecture n'est cependant pas très facile compte tenu de ce parti pris d'entrer par application, qui conduit à un éparpillement certain.

Un premier chapitre dédié uniquement aux disciplines scientifiques de la métallurgie

Le contenu disciplinaire de la métallurgie se trouve traité en partie dans le premier chapitre et dans l'annexe 25 sur l'enseignement. Néanmoins dans ce premier chapitre, le contenu disciplinaire de la métallurgie d'élaboration pourtant très riche est pratiquement absent, au profit d'autres considérations économiques ou écologiques. Il faut aller chercher l'analyse des disciplines scientifiques de la métallurgie d'élaboration en annexe 25.

Le rapport gagnerait en clarté à présenter dans un premier chapitre le contenu des disciplines scientifiques de la métallurgie, à l'exclusion de toutes autres considérations traitées dans les chapitres applicatifs suivants. Il serait souhaitable qu'il intègre aussi un résumé de l'état des lieux de l'enseignement actuel. Cela me paraît être une base indispensable pour les mesures à prendre en ce qui concerne l'enseignement.

Concernant le résumé et recommandations, trois remarques ci-après.

Les deux premières portent sur le chapeau de ce résumé où manquent l'aspect vieillissement en service et la citation du CEA (et de l'Onera) comme organismes de recherche dédiée où le nombre de métallurgistes a fortement décliné comme indiquée dans le corps du texte.

1 | Résumé et recommandations : le vieillissement des matériaux...

La première phrase du résumé présente la métallurgie comme « science des métaux et discipline technique liée à la production, la mise en forme et l'assemblage des métaux ». Il manque la maîtrise du vieillissement et des propriétés d'usage, qui est un moteur essentiel de la métallurgie appliquée et de base, par exemple pour le nucléaire au CEA et l'aéronautique à l'Onera.

Nous proposons que cet aspect de vieillissement et maîtrise des propriétés d'usage soit ajouté dans la première phrase du résumé.

2 | Résumé et recommandations : les grands utilisateurs (transport, énergie) perdent leurs experts, tout comme les centres techniques...

Cette affirmation est incomplète. Le rapport souligne aussi à juste titre que les organismes dédiés, CEA et Onera, ont vu leurs effectifs de chercheurs métallurgistes divisés par deux dans les vingt dernières années. Il me paraît indispensable de le rappeler dans le résumé. Donc « les grands utilisateurs (transport, énergie) et les organismes dédiés (CEA, Onera) perdent leurs experts tout comme les centres techniques... »

Suivent ensuite des recommandations pour une Mission interministérielle chargée de redéfinir et mettre en œuvre une nouvelle politique industrielle et de recherche-enseignement, en liaison étroite.

La recommandation 3 concerne les organismes de recherche dédiée. Elle recommande une meilleure imbrication des aspects appliqués et fondamentaux. Cette affirmation ne nous paraît pas adéquate.

3 | Résumé et recommandations :

« Recommandations 3 : que science et génie métallurgiques soient individualisés par les grands organismes de recherche comme activités idéalement interdisciplinaires, mêlant au mieux l'appliqué et le fondamental. »

Il faut être plus clair et demander le maintien d'un financement public gouvernemental pour permettre au CEA et à l'Onera de mener les recherches de métallurgie de base et appliquée nécessaires aux défis de l'industrie aéronautique et au développement des réacteurs de génération IV.

Il s'agit en effet de deux domaines où on doit développer des matériaux devant résister à des conditions en service difficiles (haute température et irradiation), et, prédire de manière fiable l'évolution des propriétés d'usage à partir de l'échelle atomique où diffusion et effets d'irradiation peuvent être décrits de manière sûre ou du moins avec des hypothèses maîtrisées, une telle prédiction nécessitant donc une simulation numérique multi-échelles.

CEA et Onera ayant développé une recherche fondamentale et appliquée reconnue au plan national et international devraient constituer des points d'appui pour un enseignement de métallurgie de qualité.

Nous proposons donc de reformuler cette recommandation 3 comme suit :

« Que la recherche métallurgique de base et appliquée conduite, dans des organismes dédiés comme le CEA et l'Onera, continue d'être financée sur fonds publics gouvernementaux pour répondre aux défis de l'industrie nucléaire et aéronautique, et, constituer des points d'appui indispensables à un enseignement de qualité. »

Vj k'ri ci g'lvpgvkpcn{ 'igh'dnc pm

COMMENTAIRE DE LA CONFÉRENCE DES PRÉSIDENTS D'UNIVERSITÉ

Francis Wagner

1 | Global

Globalement ce rapport « La Métallurgie, science et ingénierie » est un excellent document qui répond bien aux intentions des auteurs à savoir faire un état du domaine aussi bien du point de vue recherche, enseignement supérieur que du point de vue industriel, mettre en lumière les enjeux et proposer des recommandations.

2 | Recommandations

C'est une excellente chose d'avoir intégré 5 recommandations importantes dans le résumé. À l'intérieur du rapport les recommandations sont repérées par une marque de marge. Elles apparaissent comme (trop ?) nombreuses et de précision très inégale. Il faut aller au chapitre 3 pour trouver une liste bien structurée de 10 recommandations concernant en particulier l'enseignement supérieur. Il serait souhaitable, pour aider le lecteur, qu'un court chapitre 5 fasse le bilan des principales recommandations figurant tout au long du document.

3 | « Instituts de Métallurgie », structures intermédiaires

Il est suggéré dans le rapport, à juste raison à mon sens, d'envisager la création de quelques « pôles enseignement/recherche » ou « instituts de Métallurgie ». On pourrait souligner l'opportunité que pourrait offrir l'idée d'IRT (Institut de recherche technologique) introduite par les actuels documents relatifs au grand emprunt. Il serait bon de souligner aussi que ces pôles ou instituts devraient comporter les structures intermédiaires appelées de leurs vœux par les industriels, l'existant (tels les instituts ou labels Carnot) ne répondant que trop partiellement aux besoins.

4 | Attractivité des filières de l'enseignement supérieur et emploi

L'attractivité des filières d'enseignement supérieur dédiées à la métallurgie et à la science des matériaux, à l'université comme dans les écoles, dépend pour une part importante de la connaissance qu'ont les étudiants (et leurs enseignants) des possibilités d'emploi et des carrières offertes à l'issue des études. Un effort du monde industriel en direction de ces filières pour faire connaître de façon prospective les besoins et les emplois serait donc de nature à accroître l'attractivité recherchée. On pourrait même souhaiter que l'industrie s'engage sous des formes très variées (parrainage, partenariat, sponsoring, etc.).

5 | Attractivité des filières de l'enseignement supérieur et ressources documentaires

L'enseignement de la métallurgie, comme le souligne excellemment le rapport, fait appel à des connaissances relevant de multiples domaines. Il peut et doit s'appuyer sur des documents numériques de qualité (présentations type Powerpoint, cours, vidéos, animations-modélisations, etc.). Beaucoup existent mais de façon dispersée. Un centre de ressources numériques (site web) dédié à l'enseignement de la métallurgie pourrait permettre aux enseignants et aux étudiants d'accéder plus facilement et efficacement aux informations utiles.

6 | Microstructures 3D, modélisation et expérience

Le rapport met en lumière, à juste titre, l'intérêt et l'importance des outils de modélisation (§ 5 du chapitre 1 par exemple). Très souvent celles-ci sont des modélisations 3D. Elles nécessitent, et cela est bien souligné, une relation étroite avec l'expérimentation. Or les données relatives aux microstructures sont encore souvent des données 2D. Quelques possibilités quant aux moyens utiles dans ce domaine sont citées (utilisation du rayonnement synchrotron par exemple). Il serait judicieux d'insister sur la nécessité de développer rapidement dans notre pays un parc d'équipements (tomographie, microscopes *dual beam*) permettant, à coût limité, d'accroître très sensiblement l'accès à l'information 3D pour « booster » de façon fructueuse le dialogue modélisation-expérience évoqué.

COMMENTAIRE DE LA DIRECTION GÉNÉRALE DE LA COMPÉTITIVITÉ, DE L'INDUSTRIE ET DES SERVICES

Louis Trépiéd

Les remarques formulées sont de trois ordres : des remarques sur le fond du dossier, des remarques ponctuelles sur la science métallurgique et des remarques sur les recommandations formulées.

1 | Remarques sur le fond de l'argumentaire

La DGCIS partage le constat d'une forme de stagnation de la métallurgie en tant que science et secteur industriel depuis une vingtaine d'années. Mais il faut bien noter que l'évolution de la science métallurgique (qui constitue le propos central du rapport) suit les restructurations industrielles (voir par exemple la fermeture du centre de Saint-Germain-en-Laye de l'Irsid ou la fermeture du centre de recherche KME sur le cuivre de Sérifontaine). Réciproquement, une redynamisation pérenne de la science métallurgique ne sera effective que dans le cas d'un nouveau positionnement durable de l'industrie métallurgique dans notre pays.

Même si l'objectif du rapport est de traiter exclusivement de la situation française, le constat de ce déclin gagnerait à être replacé dans un cadre de comparaison avec nos grands voisins. Ce déclin est-il une spécificité française ou bien l'ensemble de la métallurgie mondiale est-il inscrit dans ce processus ? Si oui, le déclin français est-il plus aigu que celui de nos voisins ? Les recommandations à venir doivent s'inspirer de ce « benchmark ».

Le rapport se positionne comme « stratégie de la reconquête ». De ce point de vue, le rapport devrait clairement définir le territoire (éventuellement perdu) que l'on souhaite reconquérir et, partant, dans quel but, avec qui et dans quel calendrier. Une feuille de route serait ainsi un outil très utile, en particulier pour les pouvoirs publics, à la fois pour définir le but à atteindre (selon quel calendrier) mais également pour suivre les progrès accomplis, le cas échéant.

2 | Remarques sur la métallurgie en tant que science

Le rapport fait état à plusieurs reprises d'une « crise des vocations » conduisant à une désaffection des cycles métallurgiques universitaires et des écoles d'ingénieurs. Les causes en sont multiples (parmi celles-ci notons l'engouement des années 1990 pour la « création de valeur » et l'analyse financière au détriment des sciences dures). Mais il convient également d'ajouter que la métallurgie est une science mature et que les grandes découvertes (et par conséquent les grandes ruptures technologiques) sont du passé. Si l'on s'en tient aux grandes évolutions, on voit une rupture majeure à venir dans l'industrie de l'aluminium (les anodes non sacrificielles) et une rupture majeure en sidérurgie (le remplacement des hauts-fourneaux par des électrolyses). La résolution de ces grands défis ne se décrète pas et l'on doit donc prendre en compte le fait que la recherche en métallurgie est désormais une recherche incrémentale, peu mobilisatrice au regard d'autres sciences plus attractives. Ce contexte peut être insuffisant pour susciter l'intérêt et l'enthousiasme des nouvelles générations d'ingénieurs.

La DGCIS partage le constat que la métallurgie à inventer est une science pluridisciplinaire et que l'offre métallurgique doit être une offre de fonctions plutôt qu'une offre de matériaux. L'avenir est aux multi-matériaux, même si cette option pose, en particulier, de très sérieux problèmes de recyclage. Il serait donc utile que la métallurgie invente ses nouveaux territoires et, à l'instar de la chimie, pourquoi la métallurgie n'inventerait-elle pas la « métallurgie durable », englobant dans son périmètre les aspects de sécurité sanitaire et environnementale, le cycle de vie, le recyclage des multi-matériaux, les aspects réglementaires, etc.

Un point semble absent du rapport et mériterait d'y figurer : il s'agit de l'épuisement d'un certain nombre de minerais, ce qui va poser à très courte échéance des problèmes techniques insurmontables générateurs de tensions internationales. À titre d'exemple, citons le cuivre dont on annonce l'épuisement d'ici vingt-cinq ans (alors que la demande des pays émergents – Chine, Inde – va exploser dans le contexte de l'électrification de masse). Il y a là une source de recherche et d'innovation qui devrait motiver les jeunes ingénieurs.

3 | Remarques sur les recommandations

Les recommandations sur la science métallurgique et son enseignement n'appellent pas de commentaires particuliers de la DGCIS. En revanche, deux points adressés aux pouvoirs publics méritent attention :

- *La première recommandation* fait état du besoin d'une redéfinition d'une politique industrielle et de sa remise en œuvre. De ce point de vue, les cinq dernières années (pour s'en tenir au passé proche) ont vu la création des pôles de compétitivité et des grandes agences de financement de la recherche (ANR, FUI pour les projets collaboratifs, Oséo), la redéfinition de l'assiette du crédit impôt-recherche, le plan de relance, les états généraux de l'industrie, le grand emprunt... autant d'éléments majeurs pour la redynamisation de notre innovation et de notre industrie. Peut-être pourrait-on donc suggérer (suite à un argumentaire à développer) que ces éléments de politique industrielle n'adressent pas directement ou impactent insuffisamment la métallurgie et que des mesures dédiées (à préciser) seraient nécessaires pour répondre à l'urgence de la situation.
- *La quatrième recommandation* porte sur la création d'une « Mission interministérielle » ayant pour objectif de proposer au gouvernement des mesures visant la formation et la recherche, les entreprises de taille moyenne et le maintien en France d'une partie substantielle de la recherche industrielle. Cette recommandation peut être suivie, sous réserve de préciser le caractère « interministériel » que l'on souhaite lui accorder. De plus, les mesures proposées par cette mission gagneraient à s'appuyer sur une large concertation préalable de l'ensemble des parties prenantes académiques et industrielles dans le cadre de modalités à définir (table ronde, assises, « états généraux » de la métallurgie...).

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m { ' i g h v' d n e p m

COMMENTAIRE DE EDF CEIDRE

Denis Buisine

1 | Sur le plan métallurgique, l'industrie nucléaire est confrontée à des défis majeurs en matière de fabrication

Dans un contexte de reprise des fabrications de nouveaux réacteurs qui coïncide avec le besoin croissant de pièces de rechange de grande taille, il convient d'insister sur les enjeux de l'industrie nucléaire en matière de métallurgie de fabrication.

1.1 La nécessité de maîtriser les fabrications des composants lourds des centrales

À titre d'exemple, la plus grosse pièce de forge de l'îlot nucléaire d'un réacteur EPR est la virole porte-tubulures de la cuve. Cette virole, d'environ 200 t à l'état final, nécessite un lingot de 500 t qui aujourd'hui n'est réalisé qu'au Japon. Des efforts importants sont menés par l'industrie française pour acquérir et maîtriser ces moyens en France. Cette action nécessite évidemment des investissements (forge, aciérie, ...) mais s'accompagne également d'une nécessaire montée en compétence.

1.2 Une capacité industrielle de fabrication mondiale qui peine à faire face aux besoins de l'industrie nucléaire

Les ambitions en matière d'allongement de la durée de vie des centrales nucléaires conduisent à d'importants programmes de rénovation et au remplacement de composants lourds. À titre d'exemple, EDF conduit un programme de changement des générateurs de vapeur d'un grand nombre de ses centrales. Ce besoin de fabrication de pièces de rechange coïncide avec une reprise des fabrications des réacteurs neufs à travers le monde. Les fabricants mondiaux du secteur sont donc dans une situation de forte sollicitation et ils sont conduits à mener des développements rapides de leur activité.

1.3 Un besoin crucial en matière de compétence métallurgique

On comprend donc que toutes ces évolutions nécessitent des compétences en métallurgie de haut niveau qui sont aujourd'hui peu disponibles.

En définitive, en matière de métallurgie appliquée au domaine nucléaire, le rapport met en exergue la nécessité de poursuivre l'investissement dans les modes d'endommagement des matériaux dans les réacteurs (endommagement par irradiation, corrosion assistée ou non par l'irradiation...). On ne peut que soutenir ce point, dans un contexte où l'allongement de la durée de vie des centrales va fortement confronter les acteurs de ce secteur à cette thématique. Il convient toutefois de compléter ce point de vue par la nécessité d'accompagner la dynamique de fabrication dans ce secteur qui va durablement avoir besoin de compétences métallurgiques très spécifiques.

2 | De manière plus générale, des thèmes auraient peut être mérité une place plus importante

2.1 Corrosion des matériaux

Dans un grand nombre de cas, la résistance à la corrosion des métaux est le facteur qui limite la durée de vie des équipements. Cette compétence est donc déterminante, aussi bien en matière de choix de conception qu'en terme d'exploitation. Par ailleurs, les exigences environnementales deviennent de plus en plus sévères et conduisent à s'interroger souvent sur l'impact environnemental des matériaux, ce qui est encore un problème de corrosion. Face à cette situation, il faut constater que la compétence en corrosion est plutôt rare en France, ce qui nécessiterait un investissement particulier.

2.2 Normalisation

Les normalisations européennes (EN) comme les normalisations mondiales (ISO) sont des vecteurs majeurs d'utilisation des matériaux. Dans les constructions neuves, c'est souvent parce qu'un matériau est normalisé qu'il est utilisé. Il en est de même pour les procédures d'essais ou de contrôle qui ne sont mises en œuvre que lorsqu'ils sont conformes à une norme. Pour préserver la place des pratiques et des matériaux français, il convient de promouvoir les positions françaises dans les instances de normalisation européenne (CEN), voire mondiale (ISO). Par ailleurs, il est important de favoriser l'appropriation de ce champ de compétence dans les enseignements de la métallurgie.

COMMENTAIRE DE MECAMAT

Jérôme Crépin

Président

Ce rapport, constitué d'un document principal et de nombreuses annexes (25 annexes), présente de façon tout à fait correcte et exhaustive l'état et les enjeux actuels et futurs de la Métallurgie, du secteur économique et industriel associé aux liens qui lient recherche amont, recherche appliquée, enseignement et activités économiques.

Toutefois, l'objectif de ce document étant de sensibiliser les pouvoirs publics sur l'état dans lequel se trouve la discipline, il me semblerait opportun de donner plus de place au chapitre 3 concernant la recherche et l'enseignement. Je suggère notamment de transférer une partie de l'annexe 25, très complète et très intéressante dans le corps principal du document, la partie résultat et dépouillement du sondage devant rester sous forme d'annexe.

D'autre part, il me semble que la question relative au besoin de compétences (de formation) au sein du réseau PME/PMI, est fortement couplée avec celle portant sur la manière dont est actuellement structurée le tissu socio-économique entre grandes industries et la myriade de sous-traitants. Cette organisation qui s'articule sur un soutien technique assuré, jusqu'à présent, par les grands groupes élaborateurs de matériaux comme par exemple les groupes ArcelorMittal ou Alcan-RioTinto, risque d'évoluer du fait du changement de l'actionnariat et du centre de décision de ces derniers comme précisé dans le document, modifiant ainsi toute l'organisation du secteur de l'innovation industrielle. La place de la formation (universités) de la recherche (laboratoire) et du développement de centres techniques ouvert sur ce tissu industriel s'en trouvera profondément modifiée.

Enfin, il me semble qu'il manque un petit chapitre sur la structuration de la discipline et du rôle de chacun des acteurs sur le dynamisme et le développement du secteur. En effet, si la place des acteurs industriels est bien identifiée ainsi que celle des grands défis scientifiques et technologiques à relever, la distribution et la répartition des rôles dans l'animation scientifique et technologique me semble peu abordée, notamment la place des sociétés savantes et des organismes professionnels qui ont pour vocation de faire le pont entre milieu académique et industriel, notamment vis-à-vis du réseau PME/PMI.

En espérant que ces quelques remarques seront jugés constructives pour l'établissement de ce rapport, essentiel pour l'avenir de notre discipline.

COMMENTAIRE DE PSA PEUGEOT CITROËN

Olivier Delcourt

La plupart des éléments documentés dans ce rapport sont en bonne adéquation avec la situation vue de l'industrie automobile :

- les travaux menés en modélisation des phénomènes métallurgiques et des procédés de mises en forme est déterminante. En parallèle, cette démarche nécessite de développer des essais destinés à fournir les données nécessaires (lois de comportement), et valider les résultats de calcul (essais fonctionnels sur pièces) ;
- l'éco-conception doit être prise en compte très en amont pour traiter efficacement la problématique environnementale. Il s'agit d'utiliser des matériaux adaptés et d'intégrer la notion de cycle de vie ;
- l'allègement des véhicules est devenu indispensable au regard des nouvelles exigences fixées sur les émissions de CO₂ à l'horizon 2020. L'allègement passera par une offre matériau renouvelée (tôles d'acier, aluminium de fonderie, etc.) ;
- l'électrification progressive des chaînes de traction constitue également une alternative efficace aux émissions de CO₂. La métallurgie devra s'inscrire dans ces nouveaux développements.

S'ajouteront à ces réflexions quelques compléments :

- concernant la baisse des émissions de CO₂ l'augmentation des performances des moteurs fait partie des axes de travail majeurs. Les moteurs deviennent plus petits, moins lourds et avec un rendement amélioré. La recherche de solutions matériaux compatibles avec l'augmentation des sollicitations thermomécaniques, constitue une des clés de la réussite. Les matériaux et procédés concernés sont les aluminiums de fonderie (culasses, carters-cylindres), les fontes (collecteur d'échappement, turbo), les aciers forgés (bielle, vilebrequin, soupapes) ;
- la métallurgie devra probablement mieux cohabiter avec la plasturgie. Les pièces dites hybrides métal/plastiques peuvent offrir un excellent compromis tenue mécanique/coûts (par intégration de fonction). Il s'agira donc

de développer une meilleure complémentarité entre les filières matériaux, plutôt que d'entretenir une compétition parfois inefficace ;

- la nécessité d'accompagner le développement des nanomatériaux et leur utilisation dans la filière de la métallurgie (exemple : renforts dans les revêtements).

Enfin, trois points difficiles liés au fonctionnement :

- la difficulté de trouver des profils de compétences dans le domaine de la métallurgie (le domaine n'est pas jugé attractif) ;
- le manque de structure en France pour passer du stade de la recherche laboratoire à l'applicatif industriel ;
- les modes de fonctionnement trop régionaux des pôles de compétitivité (avec la difficulté de création de centres d'excellence pour des thématiques transversales).

Notons, par ailleurs, que la mise en place de la plate-forme de l'automobile (PFA), constitue un levier pour améliorer la compétitivité des filières métier (dont la métallurgie). Cette plate-forme intègre les constructeurs automobile, les équipementiers et les fournisseurs.

COMMENTAIRE DE RENAULT

Éric Vaillant

Le rapport « Métallurgie, science et ingénierie » est un document de référence pour l'ensemble des acteurs de cette filière. Il met en évidence un présent encore assez brillant tout en alertant sur un avenir proche inquiétant quant à la pérennité et au développement de ce secteur clé de l'industrie française.

Il faut sans doute pondérer certaines parties du rapport qui mettrait en compétition les matériaux métalliques avec d'autres solutions (thermoplastiques, composites,...) car la compétitivité de certaines activités emblématiques de l'industrie française (transport, énergie,...) repose en partie sur la diversité des choix technologiques matières proposés.

Ce rapport au travers des différentes thématiques abordées montre la nécessité d'inventer le concept de « métallurgie durable ».

L'essentiel des leviers de compétitivité de la filière est mis en évidence dans le document, je souhaiterais cependant mettre l'accent sur six points à développer ou renforcer en lien avec les besoins de l'industrie automobile :

- la corrosion, point faible des matériaux métalliques est un domaine dans lequel il y a un besoin de développement de compétences par la communauté scientifique pour garder des matériaux compétitifs d'autant que les dimensions « comestique » (état neuf) et « vieillissement » d'un produit sont aujourd'hui des facteurs décisifs dans le choix des consommateurs. La corrosion automobile n'est pas traitée de manière spécifique par les laboratoires et universités (contrairement à d'autres industries telles que le nucléaire, la pétrochimie ou encore le naval) alors qu'elle présente des spécificités : les fondants routiers, l'écoulement des polluants dans et autour du véhicule,...
- la sidérurgie française si elle se doit d'être une vitrine technologique par sa capacité à proposer des alliages spéciaux doit aussi montrer sa faculté à accompagner ses clients dans le développement de produit « *low cost* », pour lesquels des **matériaux à bas coût** sont un levier majeur de la performance (voir Logan pour Renault). La capacité des sidérurgistes à maîtriser la dispersion/répétabilité des produits (travaux à impulser par les laboratoires universitaires) doit permettre de « décranter » le niveau de gamme de ceux-ci pour certaines applications ;

- **le management des incertitudes** doit devenir une priorité de la filière. En effet la croissance passe par une meilleure capacité « d'accommodation » au caractère évolutif de la réglementation (voir norme REACH mais aussi CAFE pour la dépollution automobile) ainsi qu'à la prise en compte de la rareté des matières premières. Or, celle-ci est un facteur limitant sévère face auquel l'Europe est particulièrement vulnérable. L'effort fait sur la recyclabilité des métaux (et plus encore sur la conception de produits permettant un recyclage facile) est nécessaire, il doit aussi être accompagné d'une mobilisation quant à la capacité à innover pour proposer des alternatives à ces matériaux rares et donc chers ;
- la compétitivité des matériaux proposés sera jugée à l'aune de **l'analyse du cycle de vie** de ceux-ci, intégrant non seulement les dépenses énergétiques engagées (dimension globalement bien intégrée par les fabricants) mais aussi les ressources hydriques « or bleu » afin de libérer la filière d'un **comportement « aqua addicted »** non durable. L'analyse du cycle de vie va tirer les solutions techniques de l'obtention à l'utilisation, d'où la nécessité de remise en cause des process usités jusqu'alors ;
- l'allègement, préoccupation majeure de l'industrie automobile sous contrainte de limitation des émissions de CO₂ donc de réduction de la consommation, pousse les constructeurs automobiles à rechercher des matériaux ayant un rapport masse/performance optimisé. Pour certaines applications cela passe nécessairement par des solutions innovantes et performantes (durabilité, usure) dans le domaine des « **surfaces et interfaces** » afin de réduire l'épaisseur du substrat tout en préservant les caractéristiques fonctionnelles. Le développement des revêtements couche mince (tels que les DLC) est un bon exemple du besoin dans ce domaine, dont l'expansion nécessite une implication forte des industriels et chercheurs ;
- les techniques d'assemblage ont énormément progressé ces dernières années tant dans leur capacité à assurer le comportement mécanique d'une pièce que dans la mise en œuvre industrielle. Le contrôle de ces assemblages en chaîne de fabrication reste le maillon faible de ces techniques, limitant ainsi parfois leur compétitivité (temps de cycle limité par le prélèvement pour contrôle destructif ou besoin de redondance dans la liaison). Les techniques de **contrôle non destructif** des assemblages, si elles sont nombreuses et très utilisées dans les phases de développement des produits en laboratoire, doivent encore progresser dans leur mise en œuvre en contexte industriel de grande cadence. Un effort particulier doit être fait par les chercheurs dans ce domaine connexe à la métallurgie pour proposer des solutions techniques accompagnant le développement des nouveaux matériaux et les process d'assemblage associés.

COMMENTAIRE DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE MÉTALLURGIE ET DES MATÉRIAUX

Henri-Paul Lieurade

La métallurgie dans les industries mécaniques

1 | Contexte

Dans le secteur de la « Métallurgie et de la transformation des métaux », plus de 10 000 entreprises sont concernées par le travail des métaux. Ce sont pour la plupart des PME/PMI qui peuvent être rassemblées en trois « métiers » génériques : la sous-traitance (usinage, emboutissage, forge, chaudronnerie, traitement de surface), la fabrication de composants et de petits équipements, la fabrication de machines et d'équipements industriels.

Ces entreprises mettent donc en forme et/ou en œuvre des matériaux qui sont majoritairement métalliques.

2 | Les matériaux de la mécanique

2.1 Contexte

Dans les applications industrielles visées, c'est le plus souvent la surface des composants structuraux qui est la plus sollicitée en service. En effet, les principaux types d'endommagement subis concernent la fatigue mécanique et la fatigue de contact, le frottement et l'usure, la corrosion et l'oxydation, qui tous se produisent essentiellement au voisinage de la surface.

C'est pourquoi, l'intérêt « métallurgique » de l'ingénieur mécanicien se porte le plus souvent sur le matériau de surface, le matériau substrat étant choisi, non seulement pour sa résistance mécanique mais surtout pour son faible coût, sa disponibilité et la constance de ses caractéristiques de base.

2.2 Les traitements de surface

Si le nombre de nuances des « matériaux du mécanicien » est relativement limité, il n'en va pas de même pour les « **matériaux de surface** » générés par des traitements dont la variété est quasiment infinie. Ainsi dans ce domaine, l'industrie mécanique élabore et utilise les **traitements superficiels** de conversion (par action thermique, thermochimique ou mécanique), les **traitement de conversion** (anodisation, chromatation,...) et les **dépôts** par voie humide (revêtements chimiques, électrolytiques,...) ou par voie sèche (revêtements sous vide PVD ou CVD, projection thermique,...).

Grâce aux possibilités apportées par ces traitements, on peut élaborer des **surfaces fonctionnelles**, qui répondent à une ou plusieurs fonctions (par exemple : résistance à l'usure + résistance à la corrosion + esthétique). La réalisation de co-dépôts, dépôts multi-couches ou composites permet ainsi de répondre à des sollicitations en service, diverses et combinées.

La **notion d'intégrité des surfaces** vient compléter ce panorama. Cette notion concerne la mise en forme des matériaux métalliques par les divers procédés de la mécanique, cités plus haut et qui créent le plus souvent des états superficiels complexes (et souvent néfastes) en terme d'écaillage, contraintes résiduelles et rugosité. Il s'agit alors de maîtriser les conditions de mise en forme pour leur substituer des caractéristiques favorables de la surface (par exemple : optimisation de la microstructure de la peau de forgeage).

2.3 Les verrous

Les principaux verrous actuels dans l'élaboration de cette « **métallurgie de la surface** » sont les suivants :

- maîtrise des procédés de mise en œuvre, de façon à réduire la dispersion et à optimiser les performances des traitements ;
- développement de moyens d'investigation, de mesure et de contrôle des couches traitées ;
- prise en compte des règlements environnementaux (substitution de certains éléments chimiques : CrVI, Ni,..., REACH) ;
- simulation numérique des procédés.

3 | Les assemblages

3.1 Contexte

La tendance inéluctable dans la conception de composants et de **structures « multi-matériaux »**, plutôt que de pièces monolithiques, conduit à s'intéresser lourdement aux procédés d'assemblages de matériaux métalliques ou non. D'un point de vue « tenue en service », c'est alors au niveau de l'assemblage (par soudage, collage, boulonnage, rivetage...) que se situent généralement les endommagements, du fait des discontinuités géométriques, métallurgiques et physicochimiques, engendrées par le procédé mis en œuvre.

À titre d'exemple, on est capable aujourd'hui d'élaborer des aciers possédant une excellente soudabilité et une limite d'élasticité voisine de 1 200 MPa. Pour ces nuances, un assemblage bout-à-bout réalisé par soudage à l'arc conserve les mêmes caractéristiques de résistance à la traction que celles du le métal de base, avec une zone de rupture située en dehors de la liaison soudée. En revanche, sollicité en fatigue, cet assemblage possède une limite de fatigue qui ne dépasse pas 100 MPa.

Dans ce domaine, les **règles métier** ont longtemps servi de *vade mecum*. Elles sont aujourd'hui insuffisantes car les matériaux et les procédés d'assemblage ont évolué et les applications industrielles sont de plus en plus complexes. Des travaux de recherche sont à entreprendre, d'une part pour préciser les mécanismes les plus souvent multi-physiques de l'opération de soudage, d'autre part pour apporter cette connaissance dans la modélisation numérique des phénomènes, permettant, à terme, de remplacer et de généraliser les règles métiers.

3.2 Les verrous (cas des assemblages soudés)

Parmi les nombreuses questions, certaines relèvent des mêmes démarches que celles déployées dans le cas des procédés d'élaboration des matériaux métalliques, on peut citer en particulier :

- la formation de textures pendant le soudage qui est particulièrement cruciale vis-à-vis de la prévision de la ténacité des liaisons et de l'application des contrôles non destructifs (détermination des constantes élastiques et de la propagation des ondes ultrasonores) ; en effet, les modèles de solidification connus sont insuffisants car ils ne tiennent pas compte de la taille de grains quand ceux-ci sont équiaxes ;

- les conditions d'apparition des défauts métallurgiques, lors de la solidification du bain fondu ;
- la présence de défauts en zone affectée thermiquement, tels que les phénomènes de liquation rencontrés en soudage multi-passes et de fissuration à mi-chaud ;
- la prévision de la pénétration des cordons de soudure ;
- l'estimation des champs de contraintes résiduelles, des distorsions et de la géométrie du cordon.

La réponse à ces questions se situe dans le cadre du développement d'une modélisation numérique, complète et donc multi-physique du procédé. Cette modélisation qui doit tenir compte, à la fois des phénomènes de transfert dans l'arc, de la formation du cordon de soudure et des transferts thermiques, doit conduire à une estimation prédictive du gradient de microstructures et des champs de contraintes et de déformations induits par le procédé considéré.

4 | Le couple matériau/procédé

4.1 Contexte

Comme cela a été noté plus haut, les industries mécaniques se préoccupent de la **modélisation numérique des procédés** de mise en forme et de mise en œuvre des matériaux métalliques. Dans chaque cas, le Cetim s'est associé à des équipes universitaires, des entreprises concernées, y compris des PME/PMI, et des centres techniques ; on peut citer les cas suivants :

- le forgeage : le projet Simulforge a regroupé pendant 9 ans un consortium de laboratoires et d'entreprises qui a conduit à la fourniture du logiciel Forge3 ;
- le soudage : sur la base du logiciel Sysweld, le projet Musica s'est intéressé au développement d'un logiciel permettant de prévoir les contraintes et les déformations dans des structures soudées de grandes dimensions ;
- l'emboutissage : un outil métier a été développé en associant des logiciels existants et l'expertise des entreprises de la mécanique et de la sidérurgie ;
- les assemblages mécaniques : le projet en cours, Mona Lisa, s'intéresse à la conception prédictive d'assemblages par rivetage, clinchage, vissage et sertissage.

4.2 Les verrous à lever

Si les travaux recherche cités précédemment montrent l'intérêt porté à la simulation numérique des procédés, la pertinence industrielle de leurs livrables s'évalue, en particulier, à l'aune du niveau de connaissance des mécanismes physiques induits par chaque couple matériau/procédé. Les connaissances actuelles sont donc à compléter afin d'améliorer la prédictivité des résultats.

Par ailleurs, la validation des modèles numériques nécessite la mise en place d'une instrumentation et de bancs d'essais adaptés ; leur exploitation industrielle requiert des bases de données importantes et souvent spécifiques dont il convient de disposer.

Enfin, la modélisation numérique des procédés de fabrication n'intervient, actuellement, dans la boucle de conception, qu'une fois le composant défini géométriquement (par exemple par modèle CAO). Un couplage plus précoce permettrait de mieux tirer parti de la simulation, en jouant sur la configuration du produit.

5 | Évaluation du dommage

5.1 Contexte

La notion de dommage peut être sujette à controverses, compte tenu de l'échelle à laquelle elle est définie. D'un point de vue industriel, cette notion renvoie à des questions bien concrètes telles que celles-ci :

- cette structure est-elle apte à assurer la fonction pour laquelle elle a été conçue ?
- quelle durée de vie lui reste-t-il avant d'être considérée comme inapte à assurer sa fonction ?
- peut-on prolonger sa durée de vie au-delà de la période prévue au cahier des charges ?

Bien que basiques, les questions précédentes appellent des réponses souvent complexes qui dépendent, à la fois de l'état microstructural actuel du matériau (induit par l'endommagement en service), du contexte d'utilisation du composant considéré (conditions d'exploitation), des moyens de contrôle actuels et des moyens d'auscultation ou de suivi (monitoring) prévus.

5.2 La mesure du dommage

La mesure de l'endommagement des structures métalliques est largement dépendante des méthodes et des moyens d'investigation employés. Elle ne doit cependant pas occulter une étude fine des mécanismes microstructuraux induits par le dommage, de façon à mettre en évidence les phénomènes précurseurs qui permettront, à la fois de choisir les techniques de mesures et d'étalonner celles-ci.

Les phénomènes de fatigue, de fatigue-fluage, de corrosion sous contrainte ou de vieillissement par irradiation sont concernés par de telles approches que rend possible l'évolution actuelle des techniques de microscopie et d'analyses radio-cristallographiques. Ces approches, en prenant en compte les aspects multi-échelles et en s'appuyant sur la modélisation numérique des mécanismes, doivent permettre de passer des modèles phénoménologiques à des approches physiques et prédictives.

COMMENTAIRES DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

Charles-Henri de Novion

Le rapport « La Métallurgie, science et ingénierie » présente de manière très claire et convaincante l'importance de l'industrie métallurgique pour la France, le caractère spécifique de la science qui y est associée, et les défis auxquels est confrontée actuellement cette discipline. Le rapport principal est accompagné de 25 annexes, toutes intéressantes, et dont certaines sont tout à fait remarquables, comme l'annexe 3 sur la métallurgie fondamentale et la métallurgie numérique, ou l'annexe XXV sur l'enseignement de la métallurgie.

Un des points principaux (et particulièrement inquiétant) qui se dégage du rapport est la désaffection des jeunes pour la métallurgie, ce que traduit en particulier la phrase : « La Métallurgie n'apparaît pas comme une matière scientifique de pointe ni comme un besoin pour la société ». Ce constat dépasse le cas des étudiants. On le trouve dans beaucoup de milieux de la recherche, en particulier en physique. À cela est liée l'absence (presque) totale de la science et de l'ingénierie métallurgiques dans les médias de grande diffusion scientifique : *La Recherche*, *Pour la Science*, etc. Sans doute même dans les faits marquants et communiqués de presse des grands organismes comme le CNRS et le CEA. **Il semble donc qu'une action vigoureuse de « popularisation » des percées scientifiques, technologiques et industrielles, en métallurgie, est absolument nécessaire.** Il faut aussi prendre appui sur le caractère interdisciplinaire de la science métallurgique, et sur le fait que des concepts qui y ont été développés se retrouvent dans d'autres disciplines (par exemple, la germination-croissance des galaxies à partir des fluctuations du fond diffus cosmologique).

En ce qui concerne le rapport principal :

1. L'introduction est tout à fait remarquable, posant très bien le problème.
2. Le « résumé et recommandations », très clair, est une bonne synthèse du rapport. Peut-être, toutefois, présente-t-il le défaut de parler simplement de « restauration » de la discipline Métallurgie. Le point important, bien expliqué ensuite dans l'introduction, que cela ne peut pas être une restauration de la métallurgie d'avant-hier, qu'il ne faut plus faire la course

à la production, mais choisir des créneaux d'excellence, aurait dû y être mentionné et même souligné.

3. L'équilibre entre les trois chapitres n'est pas excellent. Il faudrait donner plus d'importance au chapitre 3 (« La Métallurgie : recherche et enseignement », qui ne fait actuellement que 5 pages), par rapport au chapitre 1 et surtout au chapitre 2 (28 pages) qui, par moments, rentrent trop dans les détails.
4. On ne sait pas très bien à quel public s'adresse ce rapport, mais il me semble qu'une version courte (introduction + environ 10 à 15 pages) serait très utile.
5. On peut noter une grande hétérogénéité des recommandations, ce qui est un peu gênant. Certaines sont des constats, d'autres des actions à entreprendre. Cela doit dépendre aussi du rédacteur de la partie concernée. Par exemple, dans le chapitre 1, les recommandations de la section 1 (« Métallurgie physique ») sont de caractère général et claires pour tout lecteur ; en revanche, celles de la section 2 (« Métallurgie et mécanique ») sont très techniques, et peut-être trop spécialisées au niveau de ce rapport de synthèse.
6. Quelques sujets importants auraient dû être plus discutés, en particulier les contrôles non destructifs et la corrosion. On aurait pu mentionner le problème très important de la métallurgie du silicium pour le photovoltaïque (une métallurgie tout à fait classique par réduction d'oxyde), ainsi que celui des fils de cuivre pour applications électriques (dont la qualité mécanique est très sensible à des taux infimes d'impuretés, < ppm).

Présentation à l'Académie
des sciences
par Jacques Friedel

Membre de l'Académie des sciences

- 6 juillet 2010 -

Ce projet de rapport RST sur la « Métallurgie, science et ingénierie » est issu d'une conversation avec Jean Dercourt en 2007, quand nous préparions deux réunions sur les matériaux dans le nucléaire. Une question plus générale se pose en effet : dans une évolution croissante de la nature et des besoins en matériaux de structure, la mondialisation actuelle permet-elle à la France, comme à l'Europe, de conserver une recherche scientifique, une capacité industrielle, une formation de spécialistes au niveau de ces besoins ? La métallurgie notamment, longtemps préférée dans ce domaine pour la plasticité de ses produits, comparés aux ionocovalents et aux composites, garde-t-elle une prééminence qui a passé graduellement de l'armement aux transports, aux communications, à l'énergie ?

C'est dans ce contexte que Jean Dercourt a lancé ce RST, soutenu dès le départ par l'Académie des technologies comme par l'Académie des sciences. Les seize membres du groupe de travail ainsi formé, qui viennent des grands organismes de recherche, comme de l'industrie, des universités et des écoles d'ingénieurs, couvrent, de façon je crois pertinente, les divers aspects touchant à la science, l'industrie et l'enseignement. Les deux responsables sont Yves Quéré, notre confrère physicien, qui a créé à l'École polytechnique le laboratoire des solides irradiés et André Pineau, membre mécanicien de l'Académie des technologies, qui a longtemps dirigé le laboratoire de métallurgie de l'École des mines de Paris à Évry, spécialisé dans la plasticité et la fragilité des matériaux.

Le rapport que vous avez entre les mains fait une analyse vigoureuse et sans concession de la situation actuelle en tenant compte de son évolution récente. Vingt-cinq annexes présentent de nombreux points complémentaires et seront accessibles sur CD-Rom. Un groupe de lecture critique a fait des remarques dans l'ensemble positives, dont le texte actuel tient compte. Répondant en particulier à une demande du ministère de l'Industrie pour des propositions précises de développement, ce rapport se garde au contraire de faire des projections sur l'avenir. Mais il constate que la métallurgie française possède encore une force de frappe originale et essentielle, tant du point de vue scientifique qu'industriel et il présente cinq propositions d'action sur lesquelles je reviendrai après une brève analyse, qui suit l'ordre du rapport.

1 | La science

La métallurgie est une science interdisciplinaire, où les chimistes ont longtemps dominé dans l'élaboration et les traitements de surface et les mécaniciens dans les traitements plastiques de mise en œuvre. C'est ainsi que la tour Eiffel domine Paris de ses 300 mètres depuis plus de 120 ans sous sa troisième couche

de peinture. Les physiciens, d'abord intéressés par les propriétés de conduction et de magnétisme, ont cherché à décrire toutes les propriétés des métaux en termes d'atomes et d'électrons. Ces trois points de vue se sont rejoints au milieu du siècle dernier, pour aboutir à des descriptions d'abord assez qualitatives, que le rapport appelle des modèles, souvent fondés sur des concepts spécifiques comme les lignes de dislocations ou la corrélation des mouvements électroniques. À partir de tels modèles, aussi en accord que possible avec les observations microscopiques, on cherche, par des calculs souvent lourds rendus possibles par les progrès de l'informatique, à atteindre une connaissance détaillée des propriétés macroscopiques des matériaux et leurs applications.

Cette démarche est bien analysée dans ce rapport, avec un passage possible du nanométrique au macroscopique par changements d'échelle successifs, étayée par une observation de plus en plus fine et puissante. Les succès de cette approche, bien dans l'air du temps, permettent par exemple de calculer ou de modifier certaines structures aéronautiques sans test supplémentaire. Des équipes françaises sont actives dans ce genre d'approche, tant pour des calculs partant souvent de l'échelle atomique ou électronique que pour le développement ou l'emploi d'une instrumentation en forte évolution sur l'étude des structures atomiques, des excitations électroniques, des dommages de radiations nucléaires.

Le rapport souligne aussi que la collaboration des trois disciplines scientifiques est à l'origine d'une science des matériaux qui développe des modèles valables pour toutes les phases condensées et sont susceptibles d'applications variées par des calculs de plus en plus précis. Cette idée domine l'évolution de ce secteur dans les dernières décennies, passant des métaux aux structures ionocovalentes minérales puis organiques jusqu'à la matière molle de de Gennes et vers la matière vivante.

Ce cadre général dépasse aussi l'étude des états d'équilibre pour passer à la cinétique sous l'effet de forces extérieures physiques ou chimiques, en décrivant les éventuels régimes forcés stationnaires. Cet aspect cinétique se rencontre dans la croissance des cristaux comme dans les dommages de radiation ; et l'analyse de la turbulence des fluides a profité de l'analogie des lignes de dislocations avec les lignes de vortex des supraconducteurs ou des suprafluides, et pourrait passer sans doute aux tourbillons de l'océan et de l'atmosphère qui intéressent les météorologues.

Mais un point de vue, peut-être moins triomphaliste, se dégage d'une lecture attentive du rapport et de l'annexe 3, sur le rôle relatif des modèles, de l'expérimentation et des calculs précis. Historiquement, les grandes avancées de l'après-guerre, qui concernent tant les dislocations responsables de la plasticité que les structures électroniques sous-jacentes, ont toujours fait d'abord l'objet

de modèles simplifiés fondés sur des concepts souvent nouveaux, puis d'observation et seulement après de calculs plus raffinés, eux-mêmes comparés avec l'expérience.

Dans la jungle des structures et des propriétés des matériaux, seuls des modèles assez simples et caricaturaux peuvent orienter les recherches et les explications. Dans la plupart des cas, notre connaissance ne dépasse pas au mieux ce stade. Mais même dans des domaines où des calculs précis sont devenus la norme, il faut se méfier de facteurs ou d'aspects qui n'ont pas été proprement pris en compte.

En d'autres termes, la science et l'ingénierie sont loin d'atteindre, en métallurgie, un degré de connaissances où, comme le pense Louis Trépiéd, lecteur critique au nom de la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (je cite) : « la métallurgie (serait) une science mature et les grandes découvertes et par conséquent les grandes ruptures technologiques, (seraient) du passé ! » Ce qui est vrai dans la remarque de Louis Trépiéd est que les découvertes importantes se font souvent au niveau des modèles caricaturaux plutôt que dans des calculs de précision photographique de cas particuliers qui peuvent tendre à disperser la connaissance. Il ne faudrait pas que les calculs précis tuent les modèles approchés, dans la recherche comme dans l'enseignement. De même, une observation très raffinée peut, par l'accumulation des détails perçus, cacher un point essentiel à un œil non averti. Comme dans d'autres domaines, une attention trop grande à l'outil de la recherche peut nuire à sa substance même.

L'exemple de la rupture des aciers ferritiques (à structure cubique centrée), cité par André Pineau en annexe 2, illustre bien ce propos et l'état actuel des connaissances, dû en grande partie dans ce cas aux efforts des chercheurs français.

Ainsi la rupture ductile usuelle des aciers est maintenant bien maîtrisée, par le calcul des mécaniciens français de leurs déformations plastiques, fortes et complexes ; celles-ci se développent autour des précipités fragiles de carbures, analysés pour la première fois à l'Irsid dans les années 1950, dans une des premières applications de la microscopie électronique. La déformation est due à un déplacement thermiquement activé des dislocations, captées par le réseau cubique centré du métal dans une orientation préférentielle, dite *vis*, parallèle au déplacement qu'elles produisent. Cette capture a été récemment précisée à Saclay par un calcul de structure électronique qui a aussi précisé la façon dont ces dislocations peuvent sauter localement d'une rangée atomique à une voisine, par un processus qui explique bien la baisse de la limite élastique quand on élève la température. Mais André Pineau rappelle que ces mêmes aciers ont, au-dessous de l'ambiante, une rupture fragile également étudiée à l'Irsid. Ces

ruptures sont à l'origine de nombreuses catastrophes, qui ont rompu la coque des *Liberty ships* américains de la dernière guerre, le pourtour des hublots des avions *Cornets* britanniques dans les années 1950 ou encore certains des premiers réacteurs nucléaires. Ces ruptures sont dues à une mauvaise relaxation plastique des bords de fissures, que l'on peut mesurer au cas par cas mais qui ne pourra être complètement maîtrisée que quand les glissements très brutaux et très importants observés récemment à froid à Toulouse seront bien analysés.

2 | L'industrie

La métallurgie française reste impliquée dans les grands groupes de production et d'utilisation des métaux – production notamment d'acier et d'aluminium, industries des transports – chemins de fer, automobiles, aéronautique, constructions navales – comme de l'énergie, notamment nucléaire. Un grand nombre de firmes moyennes et petites couvrent les besoins du pays dans des productions diverses.

Mais plusieurs problèmes rongent sérieusement cette activité multiforme :

- la mondialisation a fait passer la production des aciers et de l'aluminium à des groupes internationaux basés hors de France, plus intéressés par les problèmes d'approvisionnement minier et une production de masse, avec des spécialisations qui ne correspondent pas toujours aux besoins nationaux, tant en production qu'en recherche dans leurs laboratoires de l'Irsid à Metz et de l'Aluminium à Voreppe ;
- un système assez généralisé de sous-traitance dilue les connaissances scientifiques et techniques, surtout quand ces sous-traitants sont dispersés au niveau mondial ;
- les aléas brutaux de la politique comme de l'économie sont particulièrement sensibles dans une activité qui demande des investissements lourds et une formation spécifique du personnel.

3 | L'enseignement

Le rapport pense utile de conserver un enseignement de la métallurgie conjuguée avec celui d'autres matériaux, comme c'est la tendance depuis les années 1970, à condition que la métallurgie y reste bien présente, vu son intérêt didactique et ses débouchés potentiels en techniciens, ingénieurs et chercheurs, si l'on envisage au moins de conserver le volume actuel d'activités. Le rapport

souligne la baisse en nombre de cursus dédiés et en volume d'élèves des enseignements de matériaux des écoles d'ingénieurs, baisse plus forte que chez nos compétiteurs étrangers. Il souligne aussi que les formations industrielles en IUT et BTS comme les sections techniques des lycées, actuellement en révision, risquent d'être remplacées par des formations tertiaires moins onéreuses, sans l'analyse des débouchés potentiels qu'avait été faite lors de la création des IUT.

4 | Les cinq propositions d'action

Les cinq propositions d'action du rapport découlent de cette analyse. Elles demandent la reprise d'une politique industrielle à moyen et long termes qui inclue la métallurgie ; une stimulation et une rénovation de l'enseignement des matériaux à tous les niveaux ; une continuation du soutien actuel à ce secteur par les grands organismes de recherche ; et une stimulation de cette recherche pour la création de quelques pôles d'enseignement recherche dédiés, comme un développement des contacts avec la recherche des firmes moyennes et petites ainsi qu'une reprise par les grands groupes d'une recherche à moyen et long termes mieux affirmée.

Le rapport recommande la création pour trois ans d'une mission interministérielle compétente pour mettre en musique ces actions.

Conclusion

Ce rapport est remarquable par sa pertinence, son unité de vue et ses recommandations. J'espère donc que vous l'adopterez ce soir.

Il y aurait plusieurs raisons pour ne pas le faire. Je pense qu'elles seraient mauvaises :

- on peut souhaiter que la France suive l'exemple de la Grande-Bretagne et abandonne toute responsabilité dans le domaine industriel aux forces d'un marché aveugle sur le long terme, avec une gestion par des firmes étrangères ou internationales. Ce qui est envisageable pour la Grande-Bretagne ne l'est pas en France, dont les activités tertiaires, d'assurance, de commerce ou de banque n'ont pas une ampleur suffisante ; et une extension de ce choix à toute l'Europe se heurterait aux positions opposées de l'Allemagne ;

- on peut aussi penser à délaissier les activités métallurgiques pour concentrer la France dans des activités industrielles plus légères, exploitant les biotechnologies et les activités les plus respectueuses du climat. Ce rapport montre bien qu'un tel parti-pris n'évitera pas, dans ce siècle, le recours à la métallurgie, qui sera aussi présente quand nos autos seront électriques ou si l'éolien ou même le solaire cherchent à remplacer totalement le charbon ou le nucléaire ;
- on peut enfin accepter les termes de ce rapport mais penser qu'il arrive au mauvais moment, dans un temps de crise économique et financière. Il faut bien comprendre au contraire que ce qui est demandé est un changement d'attitude vers le long terme et des mesures initiales qui touchent plus à l'organisation de ce qui existe qu'à des dépenses supplémentaires importantes. Il faut dire aussi que la crise actuelle n'est pas plus grave pour nous que celle que notre pays a traversée dans les années 1930. Or c'est avant la dernière guerre que les firmes sidérurgiques françaises ont décidé de créer un grand laboratoire commun, qui sera l'Irsid, développé en 1952. Dans les années de latence durant la guerre, un petit laboratoire de métallurgie fondamentale a été créé avec le même soutien à l'École des mines de Paris. Le décret Suquet, passé au début de 1939, portait obligation à tous les corps techniques de l'État d'affecter à la recherche 10 % de leur personnel. C'est grâce à ce décret que notre Académie des sciences a possédé depuis la guerre un nombre notable de polytechniciens, dont quatre présidents ou vice-présidents. Mais surtout cette mesure simple et peu coûteuse a été un facteur positif pour le renouveau de la recherche après guerre et notamment en métallurgie ;
- certains diront sans doute que ce n'est pas uniquement au niveau du gouvernement français que cette rénovation doit avoir lieu ; et c'est bien l'esprit de ce rapport, qui interpelle autant l'industrie, les enseignants et les chercheurs. On pourrait aussi souhaiter que l'effort soit européen, comme mes premières années de la CECA – « le charbon et l'acier ». Mais je suis convaincu que c'est seulement par une initiative locale et résolue que nous pourrions faire bouger les lignes. Guillaume d'Orange n'a-t-il pas dit qu' « il n'est pas nécessaire d'espérer pour entreprendre ni de réussir pour persévérer ».