Quel avenir pour la métallurgie française ?

La métallurgie est une science pluridisciplinaire originale, qui emprunte ses outils à la physique, la mécanique et la chimie, tout en en créant de nouveaux. Elle s'adosse à un secteur industriel puissant qui, en France, représentait encore, en 2007, près de 1 800 000 emplois dans 45 000 entreprises environ.

Les Académies des sciences et des technologies viennent de publier un rapport sur l'état de la métallurgie (science, industrie et enseignement) en France, pour alerter les pouvoirs publics et l'opinion sur la situation inquiétante actuelle de cette discipline dans notre pays. Ce rapport présente un ensemble de mesures à mettre en œuvre rapidement.

Jacques Friedel nous dresse ici un panorama de la métallurgie en France dans une perspective historique, puis présente le rapport des Académies.

Nous remercions Yves Bréchet qui est à l'initiative de cet article.

La rédaction

La métallurgie en France

Jacques Friedel

Membre de l'Académie des sciences

Un récent rapport RST des Académies des sciences et des technologies analyse la situation actuelle de la métallurgie en France, tant du point de vue industriel que de la recherche et de la formation des acteurs – ouvriers, techniciens, ingénieurs, chercheurs et enseignants.

Un examen détaillé mené par André Pineau et Yves Quéré, avec bon nombre des meilleurs spécialistes de ce domaine, montre que la situation actuelle n'est pas brillante.

Néanmoins, la métallurgie française possède encore une force de frappe originale et essentielle, tant du point de vue scientifique qu'industriel. Le rapport des deux académies propose une série de recommandations pour mettre un terme à la dégradation actuelle.

Certes, la métallurgie est une vieille dame qui a déjà beaucoup donné ! Depuis 4000 ans, elle profite de la plasticité particulière des métaux à chaud et de leur durcissement possible, et a permis à l'homme préhistorique de dépasser le stade du silex, taillé ou poli. L'âge du bronze des héros de l'Iliade a développé le transport de l'étain de la Cornouaille britannique pour durcir le cuivre méditerranéen, premier lien économique européen de grande ampleur. L'âge du fer, mille ans plus tard, a doté les Celtes d'un glaive redoutable à double tranchant, fait d'un acier durci au carbone, qui pouvait être fabriqué dans toute l'Europe à partir de mines et de forêts locales.

Ces préoccupations guerrières n'ont fait que croître en développant les cuirasses puis les armes à feu, jusqu'à la fin du siècle dernier en multipliant tanks, avions, navires de combat et fusées. Mais elles se sont doublées d'applications plus pacifiques, du soc en fer des charrues pour défricher le fond des vallées, jusqu'aux cloches des églises qui, depuis le 7^e siècle, comptent le temps des jours.

La révolution industrielle a totalement transformé la vie moderne. Avec l'aide essentielle de la métallurgie, les 19^e et 20^e siècles ont développé les transports maritime, ferroviaire, automobile, aéronautique. L'emploi systématique des propriétés conductrices des métaux a développé l'éclairage, le chauffage puis les télécommunications – télégraphe, téléphone, radio, télévision. Pour produire l'énergie nécessaire à ces activités, la métallurgie est à la base des réseaux électriques terrestres ou par ondes radio et des centrales électriques, qu'elles soient au charbon, au gaz ou nucléaires, ou encore éoliennes ou solaires.

Dans tous ces domaines, la nature des matériaux utilisés peut évoluer. Le silicium reste essentiel en informatique ; le verre remplace le cuivre dans les grands réseaux téléphoniques terrestres ; les composites métal – non métal ou sans métal du tout ont remplacé les purs métaux dans les

applications spatiales, sans s'imposer jusqu'ici pour les automobiles ou les avions. Mais dans tous ces domaines, les techniques d'étude, de fabrication et d'emploi sont inspirées de celles de la métallurgie ; et la tendance depuis 40 ans est de regrouper l'enseignement et la recherche en métallurgie dans ceux, plus larges, des matériaux de structure ou de fonction, favorisant ainsi les rapports nécessaires entre chimistes, physiciens et mécaniciens.

Après la dernière guerre, stimulée par les besoins de la reconstruction puis les accords de la CECA sur « le charbon et l'acier », la France a su reprendre le rang qu'elle avait acquis au début du 20^e siècle, illustré à Paris par la Tour Eiffel et l'appellation de « Ville Lumière », mais aussi par le développement de l'aluminium, la mise au point de l'invar, l'étude du magnétisme... L'industrie métallurgique a alors développé deux grands laboratoires, l'Irsid pour les aciers et Pechiney-Voreppe pour l'aluminium, tandis que deux nouveaux organismes d'État, l'Onera et le CEA, ont participé de façon essentielle au développement de l'aéronautique, du spatial et du nucléaire. Entre les enseignements techniques et professionnels des lycées, les IUT, les écoles d'ingénieurs et les universités, notre pays s'est progressivement adapté à former le personnel nécessaire à ce renouveau.

La France a aussi participé à la compréhension des propriétés métalliques touchant à la nature même des liaisons atomiques, aux structures qu'elles peuvent développer et aux propriétés tant physicochimiques que plastiques des métaux. Ceci a pris du temps, si l'on songe que les constructeurs de la Tour Eiffel, parmi les meilleurs ingénieurs de leur temps, ignoraient que les métaux avaient une structure cristalline ! Les concepts de base se sont progressivement clarifiés dans l'entre-deux-guerres – gaz de fermions corrélés, structures cristallines et joints de grains, dislocations, lacunes... ; et c'est dans les années 50-60 que des efforts coordonnés ont permis de développer les premiers modèles

>>>

© CIRS Photonique / GEMPPM

Progression de la transformation martensitique dans un alliage à mémoire de forme CuZnAl (microscopie optique en lumière polarisée, grossissement $\times 140$).

>>>

simplifiés, puis de les comparer à des observations dans de nouveaux instruments. Avec le développement de l'informatique, on a ensuite cherché à préciser ou à corriger ces modèles faits à l'échelle atomique ; et, par des changements d'échelle successifs, on peut maintenant, dans les cas favorables, passer à la prédiction détaillée du comportement de pièces macroscopiques, voire de dispositifs entiers. Si les principes généraux concernant la stabilité des phases (cristallines, quasi-cristallines ou amorphes), leur déformation plastique, le durcissement des alliages et leur tenue sous irradiation sont cernés pour l'essentiel, on est très loin d'une technique press-bouton ! Pour prendre quelques exemples récemment rencontrés, la chimie des actinides (U, Pu, Am...) pose des problèmes complexes pouvant mettre en jeu des liaisons covalentes par mélange des orbitales 5f et 6d de ces éléments ; les aspects dynamiques de la plasticité comme des irradiations sont loin de l'équilibre thermodynamique ; les changements d'échelle pratiqués par les mécaniciens négligent jusqu'ici les instabilités plastiques locales dues à des avalanches de dislocations, dont l'étude demanderait des instruments d'observation et de calcul qui manquent aux échelles intermédiaires de temps et d'espace où elles se produisent.

Mais trois facteurs nouveaux ont changé la donne dans les trente dernières années. Leur combinaison explique le ralentissement des activités métallurgiques dans les pays développés, à l'exception de l'Allemagne et du Japon. Une vue à moyen terme impose au contraire aux pays concernés de reprendre des efforts, si possible coordonnés, dans un domaine en fait stratégique, en plein développement mondial et qui pose encore de grandes questions scientifiques et techniques.

Ces trois facteurs sont conjugués.

1 • La mondialisation croissante de l'économie a été favorisée par le développement des communications et stimulée par la croissance encore forte de la population mondiale. Elle a amené les pays développés à sous-traiter aux pays en voie de développement les activités techniques élémentaires ; et l'internationalisation des grands groupes a conduit à une perte de contrôle au niveau européen des industries de base, notamment pour l'acier et l'aluminium. La domination financière, réglée sur un marché à court terme, rend aussi difficile la prise en compte de l'évolution technique et scientifique à moyen terme.

2 • La croissance des besoins mondiaux en énergie, conséquence de cette mondialisation, se heurte à l'épuisement, programmé pour ce siècle, des ressources en pétrole et en gaz. Les ressources nouvelles tirées de l'éolien et du solaire demandent des développements en matériaux de structure et ont peu de chances de pouvoir satisfaire ces besoins mondiaux sans une aide très substantielle du charbon ou du nucléaire, avec toute la métallurgie que cela sous-tend.

3 • Les préoccupations actuelles concernant le climat posent le problème du stockage du CO_2 dégagé par l'emploi des combustibles fossiles dans les centrales électriques et par le comburant Fischer-Tropsch issu du charbon. Le regain actuel du nucléaire, s'il se confirme, demandera dans un futur proche la mise au point de réacteurs à neutrons rapides pour faire face aux besoins mondiaux d'uranium.

En conclusion, la continuation de la politique actuelle à moyen et long terme ne peut conduire qu'à une désindustrialisation totale de notre pays. Le rapport des deux académies conclut que c'est cette vision qu'il faut changer. Il propose des mesures à prendre immédiatement. ■

Extraits de la présentation à l'Académie des sciences du rapport RST « **La Métallurgie, science et ingénierie** » par Jacques Friedel, le 6 juillet 2010

Le rapport RST sur « La Métallurgie, science et ingénierie » est issu de la préparation de deux réunions sur les matériaux dans le nucléaire, organisées par l'Académie des sciences. 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 garde-t-elle une prééminence, qui a passé graduellement de l'armement aux transports, aux communications, à l'énergie ? Le rapport fait une analyse vigoureuse et sans concession de la situation actuelle, en tenant compte de son évolution récente.

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. 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 rejoins au milieu du siècle dernier, pour aboutir à des descriptions d'abord assez qualitatives, souvent fondées 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 de leurs applications. 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.

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. Cette idée domine l'évolution de ce secteur dans les dernières décennies, passant des métaux aux structures iono-covalentes minérales puis organiques jusqu'à la matière molle de de Gennes et vers la matière vivante.

Mais un point de vue, peut-être moins triomphaliste, se dégage d'une lecture attentive du rapport, concernant 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 d'abord fait l'objet de modèles simplifiés fondés sur des concepts souvent nouveaux, puis d'observations, 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. En d'autres termes, la métallurgie n'est pas une « science achevée » pour laquelle les grandes découvertes et par conséquent les grandes ruptures technologiques, seraient du passé !

2. L'industrie

La métallurgie française reste impliquée dans les grands groupes de production et d'utilisation des métaux. Un grand nombre de firmes moyennes et petites couvrent les besoins du pays dans des productions diverses. Mais plusieurs problèmes rongent cette activité multiforme :

- la mondialisation a fait passer la production des aciers et de l'aluminium à des groupes internationaux⁽¹⁾ 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 ;
- 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 conjugué 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 qui avait été faite lors de la création des IUT.

4. Conclusion

Ce rapport est remarquable par sa pertinence, son unité de vue et ses recommandations. Il y aurait plusieurs raisons pour ne pas le suivre. 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 délaisser 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 traversé 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 début 1939, donnait l'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 vu siéger 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 les 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 » ? ■

► Les recommandations du rapport

1. La reprise d'une politique industrielle à moyen et long termes, qui inclue la métallurgie.
2. Une stimulation et une rénovation de l'enseignement des matériaux à tous les niveaux, en particulier *via* des écoles thématiques.
3. Une poursuite du soutien actuel à ce secteur par les grands organismes de recherche, en particulier l'ANR et le CNRS.
4. Une stimulation de cette recherche par la création de quelques pôles d'enseignement recherche dédiés, affermissant les 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.
5. La création pour trois ans d'une mission interministérielle compétente pour mettre en musique ces actions.

“ [Nous n'éviterons 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. ”

Pour en savoir plus

- *La Métallurgie, science et ingénierie*, sous la direction d'André Pineau et Yves Quéré. Rapport sur la science et la technologie n°31, accompagné d'un CD où figurent 25 annexes. Académie des sciences et Académie des technologies (Éditions EDP Sciences, 2011, 180 p., 27 €).
- Nodal consultants, « La métallurgie en France – Une nécessité d'innovation », Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (2005). Téléchargeable sur : www.industrie.gouv.fr/enjeux/metal.pdf
- J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet et P. Combrade, *Métallurgie – Du minerai au matériau*, Dunod, collection Sciences Sup (2002).

(1) Citons en particulier l'acquisition d'Arcelor par Mittal Steel (2006) pour les aciers, et celle de Pechiney par Alcan (2003) puis d'Alcan par Rio Tinto (2007) pour l'aluminium (NdIR).