

ENSEIGNER LA METALLURGIE : PAR QUOI COMMENCER ET JUSQU'OU ALLER ?

Yves BRECHET

**Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG)
et Institut Universitaire de France (IUF)**

1 – L'enseignement de la métallurgie, ou le malade imaginaire

L'enseignement de la métallurgie vit une bien étrange période. De la métallurgie est issue la science des matériaux, et il semble parfois qu'elle soit comme jalouse de sa progéniture. Cela se pourrait comprendre si la discipline mère s'essouffait, si tous les problèmes intéressants étaient maintenant dans le domaine des disciplines filles, mais il n'en est rien. La discipline scientifique est florissante : on la voit capitalisant sur la floraison des concepts nés dans les débuts de son histoire (l'âge d'or me semble être les années 1930 à 1970 qui ont vu apparaître la plupart des idées fondamentales qui sont notre pain quotidien), bénéficiant à la fois du formidable développement des techniques expérimentales de pointe (allant des microscopies à champ proche jusqu'à l'usage des grands instruments), s'appuyant pour la modélisation sur le développement des outils de simulation (permettant aujourd'hui de comprendre mieux la germination, les transformations de phase et le comportement collectif des défauts). Elle est en pleine période de développement de ses objets d'étude : il suffit de réaliser la variété des alliages disponibles, le développement des nouvelles méthodes de « conception sur mesure » de nouveaux alliages, l'émergence des stratégies d'optimisation des procédés, l'omniprésence des aspects métallurgiques apparaissant de façon récurrente dans des domaines aussi variés que les interconnexions des circuits de l'industrie microélectronique ou les matériaux de l'industrie nucléaire, pour se convaincre de la vitalité du domaine. C'est d'une discipline fascinante dont nous allons parler, riche, innovante, à la charnière entre les disciplines fondamentales et les domaines applicatifs, une discipline qui s'appuie aussi bien sur la physique, la chimie et la mécanique sans être réductible à aucune, une véritable science de l'ingénieur dans laquelle on veut « comprendre pour faire », une discipline qui irrigue les autres domaines des matériaux, à la fois par ses concepts (l'importance centrale

ENSEIGNER LA METALLURGIE

des défauts) et par ses méthodes. On ne devrait rencontrer que des métallurgistes heureux...

Et pourtant on assiste dans la communauté métallurgiste à une forme de « repli identitaire », de morosité chronique...N'est il pas symptomatique que le titre que j'avais initialement donné « enseigner la science des matériaux » ait été perçu comme « pas assez métallurgique » (d'où son titre actuel que je me refuse à considérer comme une limitation obligée de mon propos). N'avons-nous pas tous assisté à une ou l'autre des réunions de nos sociétés savantes, à un cœur de pleureuses se lamentant sur la désaffection des étudiants pour la métallurgie, alors que le vrai drame de notre système éducatif est la désaffection des étudiants pour les disciplines scientifiques dans leur ensemble, reflétant hélas une société qui semble oublier peu à peu les leçons du siècle des lumières.

Evidemment, on doit éviter l'optimisme béat qui conduirait à nier que le nombre de sites ou l'on forme des métallurgistes décroît, que le nombre d'étudiants formé diminue. Mais au risque de froisser quelques susceptibilités, nous voudrions renverser la relation de cause à effet : ce n'est pas parce que le nombre diminue que les métallurgistes sont moroses, c'est parce que les métallurgistes sont moroses que le nombre diminue.

La demande de compétence métallurgique est présente et ne fait que croître : jusqu'à plus ample informé les tôles automobiles sont faites en aciers (et d'ailleurs en aciers de plus en plus performants) et non en « éléments finis ». Les exigences métallurgiques des nouveaux réacteurs nucléaires, ou du projet de fusion contrôlée, ne sont pas une « intendance qui suivra », elles sont au cœur du problème, elles sont le passage obligé pour qu'il ait quelque chance de quitter les rêves journalistiques et s'incarner dans les dispositifs industriels. La demande de métallurgistes ne fera que croître au moins dans le siècle à venir, et si les européens cèdent aux sirènes du malthusianisme écologique, d'autres nations en émergence reprendront ce flambeau si nous ne savons plus le porter.

Il va nous falloir des métallurgistes, il va nous falloir les former, il va nous falloir les attirer vers cette discipline fascinante. Mais nous tenons que c'est par l'ouverture et non par le renfermement, par l'approche conjointe de science fondamentale et de science de l'ingénieur et non par sa disjonction, que la métallurgie apparaîtra pour ce qu'elle est, la plus ancienne des sciences des matériaux, mais aussi la formatrice des autres branches de cette discipline. C'est donc d'enseignement de la métallurgie dont nous allons nous entretenir, mais comme de la branche mère de la science des matériaux. C'est d'une science fondamentale dont il sera question, mais d'une science pour l'ingénieur.

Cette dualité du « comprendre » et du « faire » servira de fil conducteur à la réflexion en hommage à Jacques Foct : si nous voulons enseigner à la jeune génération toute la richesse de notre discipline, quel équilibre devons nous atteindre entre les approches « déductives » (partir des concepts de base) et les approches « constructives » (partir des objets concrets). Et comme contrepoint à

cette réflexion sur le contenu, il nous faudra réfléchir sur la part de l'enseignement « magistral » et de l'enseignement « par projet »

2 Métallurgie ou science des matériaux ?

Depuis l'émergence de la discipline pédagogique de « science des matériaux » (on doit d'ailleurs son invention je crois à un éminent métallurgiste, M.E. Fine) la question du positionnement de la « discipline mère dans ce champ disciplinaire étendu est posée. Cette question se décline sous deux aspects :

(i) comment enseigner la métallurgie, la science des polymères et la science des matériaux vitreux et céramiques (ii) comment enseigner les matériaux de structure et les matériaux fonctionnels.

2.1 – Métaux, Polymères et Céramiques

On pourrait esquisser le contenu d'un enseignement métallurgique à peu près cohérent et complet qui se puisse donner en deux ans de formation à plein temps à des élèves de 2^{ème} cycle. On pourrait le construire à la lumière des évolutions récentes du domaine scientifique, mais aussi en réfléchissant aux exigences industrielles sur le long terme. Si on le décline en termes de connaissances nécessaires pour l'application de la métallurgie, il comporterait idéalement :

- La métallurgie extractive : ou comment on passe du minerai au métal. Ce domaine passait pour un peu essoufflé, mais la demande de matériau des nouvelles économies en développement autant que les nouvelles exigences en termes d'impact écologique ont complètement renouvelé la situation, et accru la demande d'ingénieurs dans ce secteur. La modélisation numérique couplant mécanique des fluides, thermique et thermodynamique est devenue un outil de base de ce secteur. Il est indispensable pour une acquisition opérationnelle de ces notions d'avoir de bonnes bases en thermodynamique, en théorie des transferts de matière et de chaleur.
- La métallurgie de la mise en forme : ou comment on passe d'un bloc de métal en fusion à une forme de semi produit. Cela comprend à la fois la solidification et la mise en forme à l'état solide, cette dernière route comprenant les méthodes de déformation et les méthodes de la métallurgie des poudres. On sent bien que la mécanique des milieux continus sera un outil indispensable pour la mise en forme. Dans ces domaines aussi la simulation numérique a fait des progrès considérables.
- La métallurgie des propriétés : elle comprend la métallurgie physique et la plasticité des alliages, l'endommagement et rupture, la tenue aux agressions chimiques.
- La métallurgie de la mise en œuvre, comprenant la métallurgie des traitements thermiques, des traitements de surface de l'assemblage, des procédés de recyclage. On pourrait ajouter à cela quelques notions sur le frottement et l'usure.

ENSEIGNER LA METALLURGIE

Pour qu'une telle formation soit une base d'acquisition de futures connaissances, elle doit s'appuyer sur un enseignement des concepts de base de la métallurgie : thermodynamique et physique statistique permettant de comprendre la théorie des alliages, transferts de matière et de chaleur, mécanique des milieux continus élémentaire, éléments de physique des solides, bases de l'électrochimie.

On pourrait se satisfaire d'une telle formation, et beaucoup de métallurgistes rêveraient de la pouvoir donner. Est-on pour autant certain qu'il faille sans plus de souci se contenter de former des métallurgistes qui soient métallurgistes seulement. Les dernières décennies ont vu se développer des compétitions féroces entre les différentes classes de matériaux (il suffit de penser à l'emballage alimentaire qui utilise le verre, le papier, les polymères, les métaux aciers et aluminium, et les hybrides comme les multicouches aluminium polymères cartons). N'est-il pas irresponsable de former des métallurgistes qui n'auraient aucune connaissance des matériaux concurrents ? N'est-il pas opportun au moment où se développe le sandwich aciers polymères de former des métallurgistes qui connaissent aussi les polymères ?

Une fois prise la conscience du problème, on a vu de nombreuses formations céder à la tentation œcuménique, prétendre enseigner sur un pied d'égalité les métaux, les polymères et les céramiques, et voulant former des généralistes également compétents en tous les matériaux, on finissait par avoir des ingénieurs incompetents dans chacun d'entre eux. Car la liste « cohérente » ci-dessus peut se décliner de façon aussi cohérente pour les polymères, allant de la formulation à l'élaboration à partir des granules, à la mise en forme, aux propriétés rhéologiques à l'état liquide et solide, aux composites et aux polymères fonctionnels. On comprend bien l'intérêt d'enseigner en parallèle l'extrusion des métaux et des polymères, le frittage des céramiques et la métallurgie des poudres, mais la physique statistique dont les polyméristes peuvent avoir besoin est autre que celle qui est utilisée dans la théorie des alliages métalliques, et sauf à allonger la durée du jour, il semble rapidement impossible de donner un enseignement cohérent et complet à la fois dans chaque classe de matériaux. Si on voulait former des métallurgistes capables de comprendre et de maîtriser la fascinante diversité des aciers, il fallait prendre le temps de leur donner une formation solide, et adaptée, en thermodynamique, en théorie des défauts, en mécanique et en théorie de la diffusion. La connaissance qu'on pouvait leur donner des autres matériaux ne pouvait être autre qu'une introduction.

On peut donner, on doit donner une introduction à toutes les classes de matériaux, de façon à faciliter les contacts ultérieurs avec d'autres spécialistes, mais il est ensuite impératif de « choisir son camp » et de former de bons métallurgistes (ou de bons céramistes ou de bons polyméristes) en s'en donnant les moyens. Le classique ouvrage de M.F. Ashby et D.R.H. Jones « Matériaux » est à mes yeux l'exemple de ce cours introductif, donnant à la fois les concepts de base et des illustrations dans chaque classe de matériaux. Un ouvrage admirable de A.H. Cottrell « Mechanical properties of matter », malheureusement épuisé, complète ce classique, dans le même état d'esprit. Sur cette base, on

peut ensuite former des métallurgistes ayant les idées et le vocabulaire de base nécessaires pour comprendre les autres matériaux. Mais la formation proprement « métallurgique » reste indispensable.

2.2 Matériaux de structure et Matériaux fonctionnels

Parallèle à la distinction entre les classes de matériaux, il existe une deuxième déclinaison en termes de fonctions attendues. On distingue classiquement les matériaux fonctionnels des matériaux de structure, les premiers transmettant ou stockant de l'énergie ou de l'information, les seconds transmettant des forces. Il est facile de récuser cette classification, en montrant les transgressions : les aimants tournants dans les moteurs doivent posséder des propriétés structurales, les polymères tissés dans les avions incorporent des fibres optiques qui permettent d'en suivre l'endommagement. Il n'en demeure pas moins que dans chaque domaine d'application, il y a la plupart du temps une fonction dominante et des fonctions auxiliaires, et que la classification en « matériaux de structure » et « matériaux fonctionnels » reste une grille de lecture commode et pertinente.

La métallurgie émerge aux deux classes de matériaux : les aimants sont souvent des matériaux métalliques, les interconnexions de la microélectronique oscillent au gré des technologies entre le cuivre et l'aluminium. Les problèmes actuels de la technologie en microélectronique sont des problèmes de métallurgistes, qu'il s'agisse des défauts structuraux dans les interconnexions, des barrières de diffusion, de l'endommagement par électromigration ou par « stress voiding ».

Dans la section précédente, nous plaidions pour une introduction à toutes les classes de matériaux (de l'ordre d'une soixantaine d'heures de cours), suivie par une formation spécifiquement métallurgiste. Faut-il envisager aussi au niveau introductif une introduction aux matériaux structuraux et aux matériaux fonctionnels ? Force est de constater que même les classiques comme Van Vleck « Materials Science », ou l'amusant livre « From the bicycle to the walkman » échouent à présenter de façon structurée les matériaux fonctionnels et les matériaux de structure. On a dans tous ces ouvrages, comme dans l'admirable série de « Open University », un catalogue d'applications plus qu'une exposition organisée. L'ouvrage de Yves Quéré « Physique des matériaux » échappe à cette critique, mais c'est parce qu'il se place au niveau de la compréhension des propriétés, et non au niveau des applications. Et encore pourrait-on lui reprocher de ne pas parler de magnétisme, de supraconductivité, de ne faire qu'effleurer les propriétés optiques. Cette différence entre les matériaux de structure et les matériaux fonctionnels dans le niveau introductif des formations pose question. Il manque à l'évidence un « Ashby et Jones » des matériaux fonctionnels. Est-ce simplement parce que le concept de « matériaux fonctionnels » est trop vaste, et devrait être décliné en « matériaux magnétiques », « matériaux optiques », « matériaux pour l'électronique », « matériaux pour le transport et le stockage de l'énergie » ... ? Ou bien est-ce que les connaissances de base de physique et de chimie des solides

ENSEIGNER LA METALLURGIE

nécessaires au développement de matériaux fonctionnels dépassent largement celles généralement données aux métallurgistes.

On pourrait se contenter, et c'est souvent le cas, de former des métallurgistes pour les applications structurales. Mais c'est se priver de débouchés considérables et de domaines d'application en plein développement. Si l'on veut former les métallurgistes de la génération à venir et leur donner toutes les chances, on ne peut se dispenser de les instruire de ces domaines d'application.

2.3. Le « Métallurgiste éclairé »

Nous voilà donc en face d'un dilemme : qui trop embrasse mal étreint. On ne peut raisonnablement vouloir une formation encyclopédiste, même dans une discipline aussi ciblée que la métallurgie. Mais on court le risque d'un vernis sans utilité si on ne construit pas solidement la formation. Pour former convenablement un métallurgiste, il nous faut lui donner à la fois une formation « commune » à tous les secteurs d'application, et une formation « spécifique » aux domaines des matériaux de structure ou des matériaux métalliques.

La « *formation commune* » pourrait se décliner comme suit :

Des concepts fondamentaux dans les disciplines de base, en thermodynamique, en physique des solides, en chimie, en électrochimie, en mécanique des milieux continus, en théorie des transferts de matière et de chaleur, et en théorie des transformations de phases. Ces concepts doivent être pensés pour qu'on puisse ensuite construire, quel que soit le domaine d'application, une formation solide aussi bien pour l'élaboration des matériaux métalliques, que pour l'analyse de leur microstructure ou les relations microstructures / propriétés. Il faudrait d'autre part donner une pratique opératoire des grandes techniques de caractérisation utilisées en métallurgie.

Une culture équilibrée, lui permettant à la fois d'avoir des notions suffisantes pour interagir avec les spécialistes d'autres classes de matériaux, et d'avoir une vision claire des exigences sur les matériaux métalliques que suppose leur utilisation dans les matériaux de structure ou les matériaux fonctionnels.

Une connaissance par l'exemple de matériaux classiquement utilisés dans les différents domaines applicatifs. La façon la plus attractive de donner cette connaissance est de partir d'objets industriels et de décliner les matériaux utilisés dans ces objets.

La « *formation spécialisée* » s'adresserait plus spécifiquement aux domaines des « matériaux fonctionnels » et des « matériaux de structure ».

Pour les matériaux métalliques à applications structurales. Elle constituerait un complément de la formation commune insistant plus sur les procédés, les propriétés et leur relation avec les microstructures, spécifiques aux deux domaines d'application. Par exemple il me semble nécessaire que tous les métallurgistes sachent les propriétés des dislocations : elles sont centrales à la compréhension de la plasticité, elles jouent un rôle important dans la maîtrise de

la résistivité du cuivre des interconnexions. Il n'est pas indispensable que tous aient une formation détaillée sur le durcissement structural. De même, il me semble anormal qu'un métallurgiste puisse ignorer ce qu'est un aimant doux, un aimant dur, un coercivité, mais l'interprétation des propriétés magnétiques par l'interaction entre les parois magnétiques et les caractéristiques microstructurales, ou le magnétisme des multicouches relèvent d'une formation « spécialisée ». On peut revenir ainsi à la liste qui commençait le paragraphe 2.1 : elle reflète clairement que l'auteur de cet article n'est pas un « métallurgiste éclairé » qu'il appelle de ses vœux ! Elle traduit un biais très fort du côté des matériaux de structure !

On pourrait relire cette liste une deuxième fois, ayant en tête les matériaux métalliques fonctionnels. Ainsi, la métallurgie extractive pour la filière « structures » aurait certainement une composante forte sur l'efficacité des procédés métallurgiques, sur les rejets de CO₂. La métallurgie extractive pour la filière « fonctionnelle » devrait avoir un souci particulier des « métaux rares », des impuretés. La métallurgie de la mise en forme aurait probablement côté « structure », une forte composante « solidification - mise en forme à l'état solide » alors que dans la filière « fonctionnelle », les procédés à partir de la phase vapeur se tailleraient la part du lion. Les versions de la métallurgie des propriétés serait encore plus distinctes, l'une se focalisation sur les propriétés mécaniques, l'autre sur les propriétés électriques, thermiques ou magnétiques, l'une sur la protection vis-à-vis de la corrosion, l'autre sur l'efficacité comme barrières de diffusion ou puits thermiques. Quant à la métallurgie de la mise en œuvre, l'implantation, la connectique remplaceraient avantageusement pour la filière « fonctionnelle » la liste proposée qui est plus adaptée à la filière « structure ».

On formerait donc ainsi deux « classes » de métallurgistes, mais qui auraient un « socle commun » leur donnant les compétences de base pour acquérir l'autre spécialité. La figure schématise cette logique de formation. L'objectif n'est pas de former des métallurgistes omniscients, mais des métallurgistes capables de connaître les autres matériaux, et de faire vivre leurs compétences dans des domaines d'application très divers.

3. Enseigner la métallurgie : Construire les outils ou analyser la complexité du réel ?

Cet article jusqu'ici s'est intéressé à la question du contenu des connaissances à acquérir. Restent deux questions fondamentales du point de vue pédagogique qui concernent la « stratégie d'acquisition » de ces connaissances, et la « méthode » la mieux appropriée. Ces deux questions sont en fait assez distinctes et méritent chacune une attention particulière.

Les « stratégies d'acquisition » peuvent se décliner en deux approches assez distinctes : une approche de « construction », et une approche « d'analyse ».

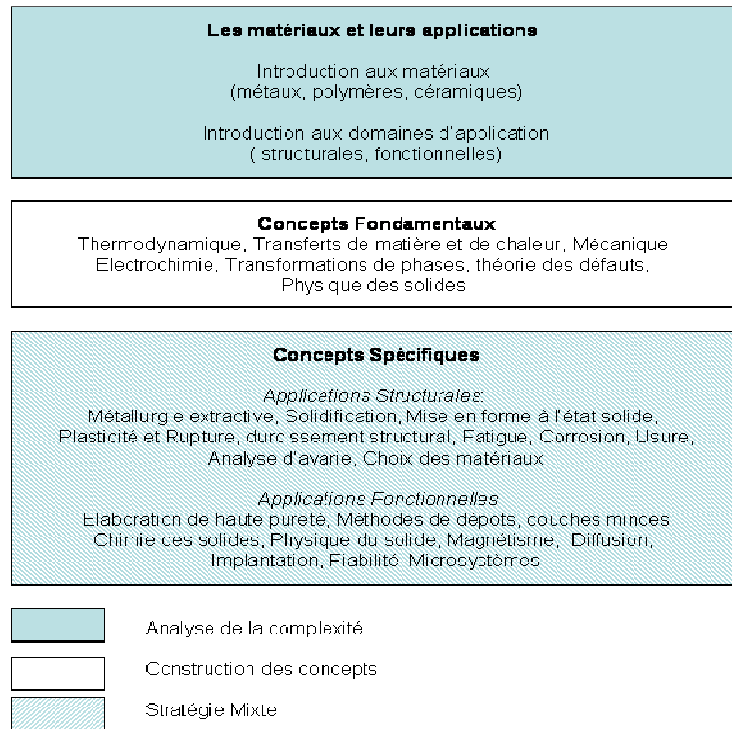
ENSEIGNER LA METALLURGIE

L'approche de « construction » qui s'appuie sur une progression depuis les concepts de base (ce que nous avons appelé la « formation commune ») jusqu'aux connaissances plus spécialisées (que l'on retrouve dans les « formations spécialisées »). Cette approche a l'avantage de la logique cartésienne, et elle assure qu'à chaque étape les connaissances nécessaires résultent de l'étape précédente ce qui rend la vie de l'enseignant plus facile. Elle exige toutefois une coordination entre les enseignants qui n'est pas toujours évidente et un risque patent est la redite. Qui de nous n'a pas expérimenté, pour peu qu'il ait eu la curiosité de faire un bilan honnête, le nombre incalculable de fois ou la barrière de germination $\Delta G (R)$ est présentée à nos étudiants. Une autre déviance de cette stratégie est «l'effet lampadaire» (par référence à cet homme qui cherchait ses clés sous le lampadaire non parce qu'il les y avait perdues, mais parce que la était la lumière !) : combien de cours de mécanique de la rupture se focalisent-ils sur la rupture fragile pour la seule raison que cette théorie est de loin la plus facile à enseigner...et à contrôler dans une débauche d'intégrales ? Enfin cette démarche présente l'inconvénient de repousser très loin le moment où l'étudiant peut comprendre la raison des questions que l'enseignant égrène devant lui.

L'approche « d'analyse » au contraire part de l'exemple : on construira un cours de mécanique de la rupture à partir d'études de cas, et il sera alors bien difficile de ne pas reconnaître l'importance de la rupture ductile. On pourrait ainsi construire un cours de physique de la plasticité à partir du cheminement historique qui a conduit à comprendre le rôle central des dislocations. L'avantage d'une telle approche est de donner à penser à partir des questions « réelles » et de motiver le questionnement. L'inconvénient est un enseignement risquant d'être morcelé, voire parcellaire.

Il n'est bien évidemment pas souhaitable de choisir l'une ou l'autre stratégie de façon « intégriste » : il est de loin préférable de tirer avantage de la complémentarité des deux approches. Dans le schéma présenté ci-dessus, il semble plus naturel d'adopter une « stratégie de construction » pour les concepts fondamentaux et une « stratégie d'analyse » pour les cours donnant la « culture matériau » ou la « culture application ». Il n'aura pas échappé au lecteur que ces cours relativement élémentaires pour lesquels la stratégie d'analyse est souhaitable, ont été placés chronologiquement avant les « concepts fondamentaux » et les « concepts avancés », parce que donnant à ces cours difficiles leur motivation. Dans le même ordre d'idée, il semble déraisonnable de ne faire les travaux pratiques qu'une fois les approches théoriques bien établies. Les notions de base dans le cours introductif doivent suffire, non pas à expliquer la totalité des observations en Travaux Pratiques, mais au moins à guider le questionnement des élèves. On évite aussi par là cette plaie immémoriale des TP, cette calamité capable de dégoûter des générations d'étudiants de toute recherche expérimentale, le « TP cherchant à placer les points sur la courbe théorique ».

Que faire des « concepts avancés » : c'est à la fois une approche d'analyse et de construction qui peut s'y appliquer. On peut construire un cours sur les transformations de phases dans les aciers à partir d'une analyse des transformations en coulée continue puis dans un train à bande : on comprend alors fort bien pourquoi la coulée continue (elle utilise le lingot comme lingotière), si commode pour les aciers, est impraticable pour les alliages d'aluminium, la nécessité de comprendre la recristallisation de l'austénite, les transformations austénite ferrite, la précipitation dans les aciers micro alliés. Une approche parallèle avec les alliages d'aluminium serait d'ailleurs des plus utiles aux ingénieurs de l'une et l'autre industrie.



Le second message de cet article est donc que par une approche à la fois d'analyse de la complexité des faits du monde réel et de construction progressive des outils de compréhension de cette complexité qu'on peut allier une motivation rapide pour le questionnement, et une construction opératoire de la compréhension.

4. Enseigner la métallurgie : l'amphi ou le projet ?

Nous voilà presque au terme de notre progression, après avoir décliné les contenus, analysé les stratégies d'acquisition des connaissances les mieux adaptées, il nous reste à discuter des méthodes pédagogiques. Une fois encore on peut proposer des approches extrêmes qui permettent de guider la réflexion, tout en gardant à l'esprit que la solution optimale est sans doute un mélange des deux approches. On peut ainsi parler d'une « méthode classique » et d'une pédagogie par projet.

La « *pédagogie classique* » consiste en la triade « cours, travaux dirigés, travaux pratiques ». Elle peut être très innovante, favorisant un travail de groupe préparé. Jusque dans l'évaluation des connaissances on pourrait éviter la balkanisation des cours en donnant aux étudiants un « problème racontant une histoire » qui les force à faire la synthèse entre tous les cours qu'ils auraient reçus. Un tel examen pourrait se dérouler sur une semaine complète, et être suivi par des oraux sur des parties du problème prises au hasard. On peut être classique sans être conservateur ! La pédagogie « classique » est très efficace pour l'acquisition des connaissances par une pratique sur des cas « idéaux » qui permettent de les rendre opératoires. Elle semble particulièrement bien adaptée pour les enseignements de « concepts fondamentaux » ou de « concepts spécialisés ». L'inconvénient d'une telle méthode quand elle est utilisée exclusivement, est de maintenir les élèves ingénieurs dans une sujétion vis-à-vis du problème posé qui ne les incite pas à faire preuve d'initiative.

La « *pédagogie par projet* » consiste au contraire en une analyse d'un problème dans toute sa complexité. Ce mode d'enseignement pousse l'étudiant à poser un problème avant que de le résoudre. Elle le force à comprendre la complexité du réel et à reconstruire dans une vision opératoire l'ensemble des connaissances qu'il aura acquises, voire à les compléter.

On peut donner un cours d'analyse d'avarie ou un cours de sélection des matériaux et des procédés à partir d'études de cas, après avoir donné une démarche structurée aux étudiants, après les avoir conduit à restructurer leurs cours de caractérisation des matériaux pour répondre à une question du type « j'aimerais avoir cette information, quelle est la technique la mieux adaptée », ou leurs connaissances des matériaux pour choisir le mieux adapté. Mais ils s'approprient plus efficacement le cours d'analyse d'avarie en faisant eux même une analyse d'avarie. La période de l'année où mon bureau était envahi de « trucs cassés » rapportés par les étudiants pour leurs projets d'analyse d'avarie, l'enthousiasme qu'ils mettent à faire une véritable « enquête policière », font partie des vrais plaisirs de l'enseignement, celui où le professeur apprend presque autant que l'étudiant. Ces expériences de « pédagogie par projet » sont particulièrement adaptées au fur et à mesure que les étudiants avancent dans leur cursus, elles permettent une transition progressive vers leur métier d'ingénieur, elles stimulent leur inventivité, leur initiative. Les quinze dernières années de projets de « choix des matériaux » construits dans cet esprit (environ 400 projets, tous donnés par des industriels) ont profondément modifié la vision

du problème et le fait même que d'anciens élèves ingénieurs proposent de tels projets à leurs successeurs témoigne de l'enrichissement qu'ils en ont reçu.

Un tel « enseignement par projet » doit-il attendre la fin de la formation ? Pour l'acquisition de connaissances, cela semble nécessaire : on pose difficilement les bonnes questions sans avoir les outils conceptuels pour analyser un problème et on n'acquiert ainsi de nouvelles compétences que sur le socle solide de compétences acquises. Par contre pour stimuler l'inventivité des étudiants, la science des matériaux et la métallurgie en particulier ont un avantage dont il serait dommage de ne pas profiter : les matériaux sont partout autour de nous, ne nombreuses expériences de « découverte » sont relativement aisées à mettre en œuvre. Dans le cours d'introduction aux matériaux, très élémentaire, dont nous avons parlé plus tôt, les étudiants devaient pour le jour de l'examen apporter une fiche sur laquelle, pour un objet courant (un trombone, une fourchette, une boule de pétanque, un CD...) ils devaient expliquer en quel matériau l'objet était fait et comment il était réalisé. Associé à aucun cours, des projets de « déniaisage taupinal » leur permettait d'étudier la ségrégation dans un mélange de poudres bimodales et bicolores à la traversée d'un entonnoir, les méandres d'un filet d'eau sur un plan incliné, l'effet d'entraînement d'une bille de plomb par une autre dans sa chute dans un long tube de miel ou la taille des fissures dans une plaque de verre soumise à un choc d'une boule de pétanque lâchée du premier deuxième jusqu'au quatrième étage (les collègues se souviennent encore du bruit sourd et régulier des boules qui tombent...). Ainsi très tôt dans leur formation d'ingénieur, on peut les amener à s'interroger et à expérimenter.

Voilà donc le troisième message de cet article : la pédagogie de projet, associée aux pédagogies plus classiques, permet une appropriation des connaissances acquises au fur et à mesure que les étudiants avancent dans leur cursus, mais elle permet aussi de renouveler la curiosité du questionnement dès les premières années de la formation.

5. Nouvelles exigences, nouveaux problèmes

La métallurgie est une science de l'ingénieur, et l'ingénieur est un acteur de la société. La société évolue et en conséquence les demandes en termes de formation doivent évoluer aussi. La dynamique d'évolution de l'enseignement d'une discipline comme la métallurgie reflète à la fois son évolution en tant que discipline scientifique, et son évolution en tant que besoin sociétal. Nous allons dans cette dernière partie de cet article illustrer par des exemples d'expériences récentes menées à Grenoble, des évolutions de notre offre de formation en métallurgie et en sciences des matériaux. Plutôt que de décliner les aspects de formation au choix des matériaux, qui nécessitent une approche comparative entre matériaux, et que nous avons à Grenoble choisi de développer avec une « pédagogie de projets » très proche de l'application industrielle, nous présenterons deux exemples qui montrent des applications directes des idées développées dans cet article. Ces enseignements sont

ENSEIGNER LA METALLURGIE

donnés dans le cadre de l'INPG et de l'IEP, et pour le deuxième exemple, dans le cadre de l'école PHELMA de l'INPG (PHysique ELectronique MATériaux).

5.1. Les matériaux et l'ingénieur citoyen

Notre époque vit une désaffection grave pour le progrès, les sciences et la technologie. Un véritable divorce de la société d'avec les sciences est patent, et porte en lui la montée de tous les obscurantismes qui se cachent tant bien que mal sous les oripeaux de la prudence. Il est important que les politiques, les journalistes prennent conscience de ce qu'est la science, et que les ingénieurs et les scientifiques aient une plus claire compréhension des conséquences politiques et sociétales de leurs décisions. Forts de cette constatation, l'INPG et Science Po Grenoble ont mis en place une formation commune au niveau Master, s'adressant aussi bien aux élèves ingénieurs qu'aux élèves de Sciences Politiques. Dans ce cadre, la science des matériaux est apparue comme un cas d'étude intéressant, précisément à cause de l'omniprésence des matériaux dans notre quotidien. Cette formation comprend 16 heures de cours : une introduction aux matériaux (4h), une introduction à la conception (4h), un cours d'écoconception (2h), un cours sur les déchets (2h), un cours sur les directives Reech sur les substances (2h) et un cours sur la réduction des émissions de CO₂ illustré par l'évolution de la production d'acier.

Les élèves effectuent ensuite en groupe une recherche et rendent un rapport sur un sujet « matériaux » ayant une incidence ou une cause politiques : les sujets donnés en 2007-2008 sont à titre d'exemple :

(1) Soudure sans plomb, réglementations, solutions techniques envisageables, conséquences économiques (2) Isolation contre le feu et remplacement de l'amiante (3) Recyclage du papier : impact environnemental et conséquences économiques (4) Matériaux et durabilité des éoliennes : coût d'exploitation, durée de vie (5) L'alimentarité des matériaux : réglementations, procédures de validations, implications sur les procédés de fabrication et les coûts (6) La réglementation des appareils sous pression (7) Contrôle des avions et assurances : coût d'exploitation, recherche de responsabilités (8) Le stockage des déchets radioactifs : les conséquences matériaux des différentes options (8) Bilan CO₂ du silicium (9) Ecobilan de la boîte boisson : compétition acier aluminium (10) Les matériaux du biomédical et la législation . Cas particulier des prothèses (11) Les matériaux pour les monnaies : disponibilité et coût (12) Recyclage du verre : coût énergétique, utilisations (13) Agromatériaux : possibilités, limites, débouchés et législation (14) Isolation thermique : laines de verre et laines de roche, remplacement par les laines naturelles, durabilité (15) (16) Les matériaux des glissières d'autoroute : compétition acier / béton. (17) Les matériaux pour le revêtement des routes (18) Les réglementations sur l'émission de CO₂ dans la production des matériaux : conséquences de ces réglementations sur l'évolution des procédés de fabrication.

On voit par cette simple énumération la variété des questions sociétales dans les quelles les matériaux, et la métallurgie en particulier, jouent un rôle central. Il devient urgent que les instances de décision politiques en prennent conscience...

Le rapport est ensuite relu et soumis à des critiques sans ménagement par un jury comprenant un scientifique des matériaux, et un sociologue. Après quoi les étudiants ont trois semaines pour rendre un dossier argumenté répondant aux objections : on évite ainsi les effets de manche, les humiliations publiques, les sophismes faciles et les étudiants apprennent qu'un problème à la fois politique et technologique nécessite une analyse rigoureuse et ne peut se satisfaire de bavardages d'estrade.

5.2. Les matériaux et le renouveau de l'industrie nucléaire

Les menaces du réchauffement climatique ont conduit à un récent et heureux retour en grâce du nucléaire comme source d'énergie. Il en résulte d'une part une demande importante d'ingénieurs métallurgistes pour maîtriser le vieillissement du parc actuel, et d'autre part une demande nouvelle concernant les nouveaux concepts de la « génération IV ». A plus long terme, le projet de fusion contrôlée dans sa phase DEMO demandera aussi des compétences dans le domaine des matériaux en général et de la métallurgie en particulier. Ce renouvellement de la demande conduit à penser une offre de formation qui ne soit pas un simple « vernis matériau » sur une compétence de neutronique et de thermohydraulique, mais une véritable « compétence métallurgiste » capable d'interagir avec les concepteurs de réacteurs. Il s'agit donc à la fois de former aux idées de base des matériaux en environnement nucléaire, et de structurer cette formation autour du concept de « cahier des charges » central à toute démarche d'ingénierie. La formation que nous allons rapidement présenter est à un niveau « Master » ou option d'une troisième année d'école d'ingénieur. L'objectif de ce semestre est de former des ingénieurs avec une compétence ciblée dans les matériaux pour l'énergie nucléaire. Ce semestre est à vocation internationale, c'est-à-dire que les cours seront donnés en anglais. Ce semestre sera construit avec des interventions importantes d'ingénieurs des centres de recherche d'EDF. Monté dans le cadre de l'Ecole PHELMA (Physique Electronique Matériaux) de l'INPG, il sera ouvert naturellement aux étudiants de la filière « Science et Génie des Matériaux » et aux étudiants de la filière « Génie Nucléaire ». Il devrait donc permettre de faire travailler ensemble des ingénieurs avec une formation matériaux et des élèves ingénieurs avec une formation en génie nucléaire. Cette volonté d'ouverture dans le recrutement suppose un préalable de « mise à niveau » en « métallurgie » pour les étudiants issus d'une filière de génie nucléaire, et en « génie nucléaire » pour les étudiants issus d'une filière « matériaux ». Le même souci d'ouverture nous a conduits à prévoir une série de conférences sur les sources d'énergie dans le monde, sur les problèmes de prolifération, sur les aspects économiques et politiques de la question énergétique. Le cœur proprement technique de la formation (soit environ 200h) se décline en trois groupes de cours. Les stratégies d'acquisition relèvent de la « construction » ou de « l'analyse » suivant les cas, et la pédagogie choisie est une pédagogie « mixte » mêlant les approches classiques et les apprentissages par projet.

ENSEIGNER LA METALLURGIE

Un cours d'une quarantaine d'heures concerne la conception des réacteurs et le choix des matériaux. C'est le cœur technologique de la formation, qui s'attachera pour chaque type de réacteur à décliner le cahier des charges « matériaux » et les choix effectués. On s'attachera aussi à bien dégager les exigences issues de l'analyse des situations incidentelles ou accidentelles. Le cœur scientifique (120h) de la formation concerne les matériaux en environnement nucléaire. On y enseignera la physique des matériaux irradiés : concepts / méthodes expérimentales / simulations numériques. On étudiera Le vieillissement des structures (métaux, polymères et bétons et verres) en donnant les bases physicochimiques de la compréhension de la durabilité des composants des centrales. Le troisième ensemble de cours, une quarantaine d'heures, est basé sur le « retour d'expérience » : des ingénieurs d'EDF traiteront des problèmes et technologies spécifiques des composants de centrales. Viendront ensuite des « cours spécifiques », la plupart sous forme de conférences, portant sur la sûreté nucléaire, sur l'aval du cycle, sur le démantèlement. Enfin, cette vision globale des problèmes de matériaux en environnement nucléaire sera appliquée à l'analyse des différentes options de la « génération IV » et des réacteurs à fusion.

Cette formation qui commencera en 2008 illustre les idées présentées dans cet article : une double démarche de construction des outils et d'analyse de la complexité du réel, une pédagogie mixte alliant approches classiques et apprentissage par projets, une volonté d'allier une compétence solide dans une spécialité (la métallurgie du nucléaire) avec une capacité à travailler avec d'autres domaines d'expertise (les concepteurs de centrales).

7. Conclusions

Nous commençons cet article par une provocation : l'enseignement de la métallurgie serait un « malade imaginaire ». La boutade doit être prise comme une incitation à un optimisme actif. Certes ce domaine traîne avec lui une image négative de secteur industriel ayant vécu une restructuration douloureuse, et une absence d'image de la notion de « matériau », au contraire des « produits » qui peuvent plus facilement être valorisés, et on peut comprendre une certaine désaffection des étudiants.

Mais à trop entretenir la sinistrose, elle finit par devenir endémique. Il est urgent de rappeler les faits : le besoin applicatif est considérable et les questions scientifiques soulevées par la discipline en font une activité de recherche très active pour peu qu'on veuille bien dépasser ces images superficielles. En particulier, les développements expérimentaux des dix dernières années, l'utilisation intensive des grands instruments de caractérisation, et les nouvelles méthodes de simulations numériques ont transformé le visage de la discipline en profondeur. D'un point de vue industriel, les alliages développés dans les dernières années, qui ont des propriétés considérablement améliorées, ne le sont plus par une procédure d'essai/erreur, mais bien par une intégration profonde des outils de modélisation de la

métallurgie physique dans la pratique des meilleurs centres de R et D industrielle.

C'est une discipline fascinante de diversité, de richesse, de dynamisme que nous avons à enseigner. Mais faut que notre enseignement soit à la hauteur de ce qu'est la métallurgie, au lieu de refléter une vision de « forteresse assiégée ». Il faut qu'en formant des métallurgistes, nous les formions ouverts aux autres matériaux, et prêts à contribuer à l'essor grandissant des « multimatériaux ». Il faut que nous leur enseignions des concepts de base qui leur permettent, moyennant une étape de spécialisation, de contribuer au développement de matériaux de structure ou de matériaux fonctionnels, et qu'ils soient par cela les architectes des futurs « matériaux multifonctionnels ». Il faut par une pédagogie innovante leur apprendre à poser les problèmes au lieu de leur laisser croire qu'il « suffit » de les résoudre.

Remerciements

Le sujet de cette contribution a été suggéré par Jacques Foct, offrant à l'auteur l'occasion de réfléchir à la formation en métallurgie. Puisse ce présent pour son départ en retraite le rassurer sur l'avenir d'une discipline qu'il a si bien servie.

C'est un plaisir pour l'auteur de remercier ses jeunes collègues, Alexis Deschamps, Luc Salvo, Muriel Véron pour une passion partagée dans l'enseignement de la métallurgie.

Ecrire des ouvrages avec Jean Philibert et Michael Ashby est une leçon admirable de pédagogie.

Et enfin l'auteur aimerait dire sa reconnaissance à Yves Quéré qui, comme à beaucoup d'autres, il y a plus de vingt cinq ans, lui a transmis sa passion pour la métallurgie, et cette conception si riche de la science qui voit en elle une forme de culture et non simplement un métier.