

Chapitre 5 : L'optimisation des matériaux. : la base de l'économie circulaire

Table des matières

5-1 Introduction - Matériaux et Économie circulaire : Une révolution par une production écoresponsable et par le recyclage est-elle possible ?	2
5-2 Matériaux et transition écologique : Réduction de l'impact énergétique et environnemental des métaux abondants.....	5
5-3 Vers l'éco-conception et la géo-conception de nouveaux alliages métalliques	13
5-4 Construction et Environnement.....	20
5-5 Recyclage co-produits et déchets de la métallurgie	22
5-6 Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages métalliques.....	24

5-1 Introduction - Matériaux et Économie circulaire : Une révolution par une production écoresponsable et par le recyclage est-elle possible ?

Emmanuel HOROWITZ, François MOUSSY, Bruno CHENAL

Mots Clefs : économie circulaire, écoconception, recyclage, environnement, métaux rares

Alerte/Enjeu N° 1 : des besoins qualitatifs et quantitatifs croissants en matériaux avec risque de pénurie à moyen terme

Alerte/Enjeu N°1bis : réduire l’empreinte écologique de leur cycle de production.

Même en faisant abstraction de secteurs importants (médical, nouvelles technologies de l’information,...) nous observons que l’économie des années à venir va impliquer une demande accrue de matériaux , et donc de matières premières, soit dans l’industrie traditionnelle, soit dans des domaines plus innovants (production d’électricité renouvelable, stockage d’énergie mobile pour les transports (« batteries »), cycle de l’hydrogène, stockage de l’électricité et d’autres vecteurs d’énergie); les technologies correspondantes nécessitent une quantité fortement croissante de matières premières.

En premier lieu il y a les matériaux « traditionnels » (fer, acier, aluminium, titane, cuivre, zinc, béton, sable, ciments), ils sont abondants ou faciles à produire en grande quantité.

Plusieurs organismes français de R&D ont déjà mis en route des programmes de recherche, d’une part pour optimiser l’efficacité énergétique de productions actuelles, d’autre part pour réduire grâce à de nouveaux procédés leur empreinte écologique et leurs rejets de CO2.

Pour améliorer l’**efficacité énergétique** des procédés, il faut d’une part diminuer la consommation énergétique grâce à une **conduite améliorée des procédés**. Ceci peut être fait grâce à **des jumeaux numériques** (Digital Twin) basés sur de la simulation numérique couplée à du machine learning et de l’intelligence artificielle. Une meilleure connaissance des procédés conduira également à l’élimination des défauts et donc à **une diminution des rebuts**.

Il y a aussi une utilisation accrue de « nouveaux » matériaux dont les ressources sont limitées ou difficile d’accès :

- le lithium et le cobalt (pour le stockage chimique d’électricité (batteries et notamment batteries de véhicules électriques))
- les terres rares telles que le dysprosium, le néodyme et le samarium pour les aimants permanents utilisés dans des éoliennes et des moteurs de véhicule ou l’yttrium dans les superalliages
- d’autres éléments rares dont le tellure, l’indium, l’étain, l’argent, le gallium, le cadmium, utilisés pour les technologies en couches minces des panneaux solaires
- des métaux rares comme le platine, l’iridium, le cobalt, le ruthénium, l’indium et l’or utilisés dans divers types de catalyseurs (pour les technologies de l’hydrogène et des biocarburants) ou dans les superalliages pour les moteurs aéronautiques. La République Démocratique du Congo produit actuellement 64% du cobalt mondial, le Brésil 90% de niobium,; la Chine produit 57% de l’indium mondial et 95% de terres rares. L’utilisateur français n’a aucun moyen d’influer sur la pérennité de ces approvisionnements ou sur leur impact environnemental.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Trois observations peuvent être faites :

- à court terme, les besoins français en lithium et cobalt peuvent dépasser la production mondiale
- pour plusieurs matières premières « critiques », des pays producteurs sont souvent en position de monopole.
- de plus, les conditions actuelles de production de plusieurs matières premières sont inacceptables suivant des critères d'environnement et de santé

Recommandations et Propositions :

- Il faut dans un premier temps **aider les programmes d'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés de production existants**.
- On peut également souhaiter **développer des productions nationales éco-responsables** à partir du sous-sol, français y compris en métropole (lithium, indium), mais une étude préalable de faisabilité devra être finalisée dans chaque cas, en tenant compte des aspects techniques et sociétaux.
- De manière plus modeste (et peut-être plus réaliste) on peut, dès à présent, pour chaque matière première, développer le concept d'« écobilan » (qui prendra en compte l'exploitation d'un matériau, les diverses étapes de sa transformation et de sa consommation, son transport) ; à moyen terme, on pourrait **pénaliser ou interdire les produits ayant un trop mauvais « écobilan »** par des taxes ou même des réglementations rédhibitoires.

Alerte/Enjeu N° 2 : Une écoconception des matériaux et alliages est indispensable

Il y a aujourd'hui un trop grand nombre de matériaux ou alliages qui au mieux ne sont recyclables que sur eux-mêmes et au pire pour lesquels il n'y a pas de valorisation possible. Pendant des décennies nous avons cherché à améliorer les performances des matériaux sans se préoccuper de leur valorisation en fin de vie. D'autre part lors de la collecte, du démantèlement (déconstruction) et du recyclage, il n'est pas toujours possible de trier et de séparer tous les types de matériaux et plus particulièrement ceux qui sont incompatibles entre eux. **Les moyens de tri sélectifs doivent progresser mais ils ne seront pas suffisants.**

Les nouveaux matériaux et alliages doivent aujourd'hui être conçus en intégrant les contraintes environnementales et de recyclage. Ceci conduit à ajouter de **nouvelles contraintes dans la conception d'alliages** telles que l'impact des impuretés provenant du recyclage, les risques de pollution indirecte par mélange lors du recyclage ou à l'inverse la compatibilité avec d'autres matériaux, la rareté, l'impact écologique... De **nouvelles méthodes numériques de conception d'alliages** pourraient permettre de délimiter de nouveaux domaines d'exploration de composition.

Sachant que la pollution ou les mélanges sont probablement inévitables lors du recyclage, il faut également travailler sur une **meilleure tolérance des alliages aux « impuretés » issues du recyclage**. Il s'agit de déterminer les moyens de contrer leurs effets délétères. Il est également possible à l'inverse de baser la composition de nouveaux matériaux précisément sur le mélange de produit du recyclage.

Recommandations et Propositions

- **il faut établir des spécifications de produits plus économes en matériaux rares et/ou intégrant les contraintes liées au recyclage**
- **il faut développer le recyclage et le tri des produits en fin de vie en généralisant des techniques de recyclage à tous les niveaux.**

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Alerte / Enjeu N°3 : développer de nouvelles méthodes de production et de recyclage, moins consommatrice en énergie.

Si l'on intègre l'impact environnemental (énergie, émission GHG, effluents, déchets...), il est possible aujourd'hui de **revisiter certains procédés comme l'hydrométallurgie** ou de **développer de nouveaux procédés**.

L'**hydrométallurgie qui est moins consommatrice en énergie** que la pyrométallurgie permet par exemple de valoriser des minerais complexes multiéléments et notamment d'y récupérer des métaux dits mineurs.

Le recyclage passe traditionnellement par une étape de refusion consommatrice en énergie. Il est donc primordial **d'explorer de nouvelles méthodes de recyclage, tel que le recyclage par voie solide**. Cette méthode consiste à compacter directement les copeaux obtenus par broyage sous forme solide par des procédés tels que l'extrusion ou le frittage ou toute autre méthode de consolidation.

Recommandations et Propositions

- **Les efforts de recherche et de développement tant industriel qu'académique doivent être accrus sur les procédés de recyclage. Cela doit s'accompagner par la création d'équipes dédiés qui font appel à des compétences pluridisciplinaires (hydrométallurgie, métallurgie en phase liquide, modélisation des procédés...)**
- **Cet effort nécessite la mise en place de moyens expérimentaux et de pilotes semi-industriels sur des plateformes dédiées, par exemples dans les IRT.**
- **Parallèlement, il faudra développer les incitations fiscales et les normes réglementaires pour encourager et encadrer le recyclage.**

Alerte / Enjeu N°4 : les matériaux de construction

Une des sources principales d'émission concerne le bâtiment avec des pistes de travail sur l'isolation pour réduire l'énergie de chauffage (ainsi que celle de climatisation) ainsi que sur la diminution du coût énergétique de production des matériaux de construction (énergie « grise »). Il faut développer de nouveaux matériaux à très forte capacité d'isolation. Parallèlement on peut penser à développer une filière de production de matériaux de construction à faible empreinte carbone en utilisant notamment des matériaux issus du recyclage de sous-produits des procédés métallurgiques ou des céramiques des fours. Enfin il est possible de développer des matériaux à « capacité de guérison » pour des solutions plus durables.

Recommandations et Propositions

- **Des compétences pour développer ces nouveaux matériaux existent dans les laboratoires. Il y a un manque de financement et de sponsors industriels.**

Références :

[1] *Stratégie d'utilisation des ressources du sous-sol pour la transition énergétique française ; les métaux rares (Rapport commun de l'académie des sciences et de l'académie des technologies ; mai 2018)*

[2] *La guerre des métaux rares (Guillaume Pitron, Editions les liens qui libèrent, 2019)*

5-2 Matériaux et transition écologique : Réduction de l'impact énergétique et environnemental des métaux abondants

Sébastien ALLAIN, Fabrice PATISSON et Thibault QUATRAVAUX – Institut Jean Lamour

Mots Clefs : Énergie, environnement, métaux

CONSTAT POST COVID SUR LE THÈME

Les besoins industriels en matériaux augmentent malgré des ressources mondiales limitées (matières premières, énergie) et des enjeux environnementaux de plus en plus prégnants. De fait **les matériaux doivent être utilisés aux mieux (fonctionnalité) et le plus longtemps possible (durabilité), mais aussi être produits de façon raisonnable et si possible réutilisés (recyclabilité)**. Compte tenu des volumes en jeu, si l'on exclut les bétons (7,3 mds de m³ par an), les métaux représentent les matériaux les plus abondamment utilisés dans l'industrie de nos jours (acier – 1.8 mds de t par an / aluminium – 64 Mt par an / titane – 130 kt par an) et sont donc les plus critiques de ce point de vue. Dans un contexte de filière, la moindre amélioration de leur formulation (matières premières, ressources), de leur production (énergie/eau/émission CO₂) ou encore de leur recyclage/réutilisation permettra de réduire substantiellement et de façon directe leur impact environnemental. A titre d'exemple, d'après l'association EUROFER, l'industrie sidérurgique est aujourd'hui au niveau mondial responsable de 7 % des émissions de gaz à effet de serre anthropiques et de 31 % des émissions industrielles [1]. C'est pourquoi le département SI2M de l'IJL soutient toutes les actions de recherche visant à **réduire directement l'empreinte environnementale et énergétique des procédés de production des métaux industriels d'utilisation courante**. Son action dans ce domaine est déjà forte. Il s'agit non seulement d'initiatives de moyen terme (+5ans) mais aussi de long terme (+20 ans) [*Cf. la participation de l'IJL aux programmes européen ULCOS (2004-10) et national Valorco (2014-18)*], qui s'inscrivent dans les priorités nationales et internationales vis-à-vis du changement climatique.

L'optimisation des performances de ces métaux (propriétés mécaniques ou fonctionnelles, durabilité) ou leur **multi-fonctionnalisation** constituent également de forts enjeux. En effet, ces recherches conduisent aussi à un bénéfice environnemental lors de l'usage des matériaux pour une application donnée. Ce second levier est indirect mais il est fondamental dans les secteurs du génie civil et du transport. Par exemple, alléger une structure automobile par l'utilisation d'aciers plus résistants permet une réduction des consommations énergétiques (30% d'allègement permettent jusqu'à 8% de réduction) et des émissions de CO₂ des véhicules thermiques et concourt aussi à augmenter l'autonomie des futurs véhicules électriques à performance de sécurité équivalente. De même, augmenter la résistance à chaud des alliages de titane permettra la substitution des alliages de nickel dans les moteurs d'avions et engendrera des gains substantiels en terme de consommation de carburants dans le secteur aéronautique.

Nos travaux dans le domaine de la métallurgie utilisent ces leviers direct et indirect d'amélioration et se déclinent en trois grandes activités :

- **Réduction de l'empreinte environnementale des procédés métallurgiques en phase liquide**
- **Réduction des émissions de CO₂ de la sidérurgie**
- **Optimisation des performances et de la durabilité des alliages métalliques industriels par le design des microstructures**

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Ces activités relèvent très largement du **LabEX DAMAS, Laboratoire d'excellence sur le Design d'Alliages Métalliques pour l'Allègement des Structures**, lancé en 2012. Il vient d'être reconduit pour 5 ans.

Dans ces activités, une large place est et sera faite aux outils de modélisation et de simulation numériques multi-échelles. Il s'agit de modéliser à la fois des procédés et des matériaux maîtrisés d'un point de vue industriel et étudiés de longue date comme de nouveaux procédés, nouveaux matériaux et alliages et nouvelles microstructures. Ces travaux sont tout à fait en phase avec la roadmap de la Nasa [2] et participent à la définition et aux connaissances indispensables pour construire **l'Industrie du Futur** [3,4]. L'intégration des techniques de **deep learning, d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle** dans nos travaux fait aussi partie de nos grands challenges.

Références bibliographiques générales

1. *Rapport d'Information du Sénat « Sur les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXIe siècle : opportunité de croissance et de développement », Mme Valérie LÉTARD, juillet 2019*
 2. *Vision 2040 : A Roadmap for Integrated, Multiscale Modelling and Simulation of Materials and Systems, NASA/CR-2018-219771*
 3. *Konter, A. W. A., Farivar, H., Post, J., & Prah, U. (2016). Industrial needs for ICME. Jom, 68(1), 59-69.*
 4. *Strategic Research Agenda ESTEP (European Steel Platform) 2017*
-

ALERTE / ENJEU N°1 : RÉDUCTION DE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DES PROCÉDÉS MÉTALLURGIQUES EN PHASE LIQUIDE

Les objectifs de cette recherche visent à optimiser l'**élaboration** des matériaux métalliques, en termes de qualité et durabilité des produits, de coût énergétique, et de leur impact environnemental. Une des clefs concerne la maîtrise des défauts, maîtrise qui aura un impact direct et positif sur le bilan énergétique des produits le plus courants (diminution du taux de rebut par exemple). Ce thème couvre une large gamme de **procédés de fabrication** amont et conventionnels par voie liquide, allant des fours de fusions (hauts-fourneaux ou filière électrique) et d'affinage à la lingotière ou la coulée continue, mais couvre aussi les procédés innovants comme ceux de la **fabrication additive** ainsi que les procédés de mise en œuvre avec fusion partielle comme le **soudage**.

Ces recherches sur les procédés métallurgiques sont en très grande partie menées en collaboration directe avec les élaborateurs industriels car ils nécessitent une connaissance pratique des outils et pratiques industriels. La modélisation mathématique et la simulation numérique constituent des techniques privilégiées, mais les efforts portent également sur les études expérimentales, à l'échelle des installations de laboratoire (de quelques g à quelques kg), à l'échelle intermédiaire pilote (de quelques kg à environ 100 kg), et à l'échelle des réacteurs industriels (jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes). Cette double démarche se retrouve dans la « Chaire de Métallurgie Métal Liquide ». Cette Chaire a été créée par cinq grands groupes industriels (ArcelorMittal, Aperam, Eramet, Safran et Vallourec), en collaboration avec l'Université de Lorraine, le CNRS, la Métropole du Grand Nancy et la Région Grand Est, afin de renforcer le potentiel de la France dans le domaine de la métallurgie d'élaboration. Ce projet scientifique vise à mieux comprendre les phénomènes réactionnels du métal liquide, que ce soit dans le cadre de la formation des inclusions endogènes ou des interactions avec le laitier, les réfractaires et l'atmosphère.

Une autre composante importante du travail de recherche dans ce thème consiste à étudier la formation des hétérogénéités chimiques et microstructurales formées lors de la **solidification** de ces alliages métalliques. Le défi principal est de relier des phénomènes couplés sur des échelles spatiales

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

et temporelles variant de 5 à 7 ordres de grandeurs dépendant à la fois des procédés et des mécanismes élémentaires mis en œuvre. A ces défis s'ajoutent les contraintes inhérentes aux alliages étudiés, souvent d'intérêt technologiques (aciers, alliages de nickel, de titane), dont les températures de fusion sont supérieures à 1400°C, liés aux demandes des partenaires industriels (ArcelorMittal Industeel, EDF, Framatome, SAFRAN). Une chaire industrielle soutenue par (ArcelorMittal, CEA, EDF, Framatome) est également en cours de finalisation dans ce domaine.

Quelques exemples de recherche d'intérêt stratégiques, sur différents procédés clefs, largement utilisés dans l'industrie :

Optimisation des procédés de refusion ESR, VAR, PAM

Les modèles de procédés développés à l'IJL sont directement utilisés par nos partenaires industriels – Framatome, Eramet, Timet, Aperam, Safran – pour simuler la croissance et la solidification de lingots d'alliages métalliques à haute valeur ajoutée (titane, aciers maraging, zirconium, superalliages base nickel...). Le passage à des simulations 3D constituera la base de nos futures études numériques. Parallèlement, afin d'améliorer constamment les modèles, une activité expérimentale importante est nécessaire : évaluation du comportement dynamique des arcs électriques sous vide, mesure des transferts thermiques dans les creusets froids, visualisation de la surface libre d'un bain métallique et caractérisation des échanges plasma/métal liquide...

Étude théorique et expérimentale de la croissance de gouttes à partir d'un film métallique liquide

À partir de l'observation (campagnes de mesures sur des fours pilotes et industriels) de la surface libre et de la cinétique de formation et de chute des gouttes métalliques, nous développerons des modèles numériques basés sur une représentation du changement de phase (fusion) du métal et une description hydrodynamique 3D pour suivre la dynamique de déformation de la surface et le transfert de matière sous forme de gouttes ou de ponts métalliques.

Maîtrise du comportement inclusionnaire à l'échelle mésoscopique et à celle du réacteur métallurgique (par exemple des poches de traitement d'aciers)

Dans un réacteur métallurgique (ex : poche de traitement d'acier), l'affinage chimique conduit à une évolution de la population inclusionnaire responsable de la propreté des demi-produits. L'optimisation de l'ensemble du procédé nécessite d'associer simulation CFD à l'échelle du procédé et compréhension des interactions physiques réelles (mouillabilité, contacts électrochimiques...), pour déterminer explicitement les mécanismes d'agrégation, la morphologie des agrégats résultants, le dépôt et la capture des inclusions solides aux parois et surfaces libres, et la flottation dans le métal liquide.

Mesure de la cinétique d'évaporation sous vide dans les métaux à haut point de fusion (alliages de titane ou de zirconium principalement)

Grâce à un dispositif expérimental original, implanté à l'intérieur du four à bombardement électronique de l'IJL, mis au point ces dernières années, nous pouvons accéder aux flux d'évaporation de chaque élément en solution et en déduire leurs coefficients d'activité à haute température dans un alliage liquide. Il s'agit de grandeurs thermodynamiques non-reportées dans la littérature à ce jour, très précieuses pour le contrôle de la chimie lors de l'élaboration sous vide. Les métaux visés sont par exemple les alliages de titane ou de zirconium.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Étude de la formation des hétérogénéités chimiques et structurales dans les semi-produits (lingots, de forge, coulée continue et semi-continue) en particulier à l'échelle mésoscopique

Une activité importante sera menée sur la formation des défauts formés dans les semi-produits à une échelle mésoscopique. Constituée d'un ensemble de quelques dizaines de grains qui peuvent être centimétriques dans les lingots de grande taille, cette échelle a peu été étudiée jusqu'à présent. Des caractérisations et modélisations fines et tridimensionnelles seront nécessaires pour déterminer l'intensité du couplage entre les phénomènes microscopiques (germination/croissance, champ de diffusion) et macroscopiques (transport de chaleur et de matière). Le passage en 3D du code de calcul SOLID actuellement développé à l'IJL constitue également un enjeu important.

Procédés de solidification rapide en collaboration avec Constellium, Renault, l'Institut de Soudure

Elle implique un contrôle toujours plus fin des conditions locales de solidification afin de maîtriser la formation des microstructures et les propriétés qui en résultent. En particulier, les conditions locales de croissance (gradient thermique et vitesse de l'interface) sélectionnent la microstructure et déterminent les structures de grain. Il sera nécessaire d'étudier l'influence de ces conditions, souvent hors-équilibre sur la formation des phases, leur morphologie et leur possible évolution lors de possibles cycles thermiques ultérieurs.

Ces travaux de recherche nécessitent des moyens expérimentaux spécifiques, permettant de conduire des mesures à des échelles spatiales et temporelles extrêmement faibles et à haute température, qui sont intégrés dans une plate-forme « Élaboration d'alliages métalliques par passage à l'état liquide » à l'IJL. Ces activités sur les procédés et la solidification nécessiteront aussi des investissements dans des dispositifs permettant de simuler les conditions industrielles du procédé et différents instruments pour analyser les compositions chimiques des produits de réactions.

Publications significatives récentes [301]

- Choi, W., Jourdan, J., Matveichev, A., Jardy, A., & Bellot, J. P. (2017). Kinetics of Evaporation of Alloying Elements under Vacuum: Application to Ti alloys in Electron Beam Melting. *High Temperature Materials and Processes*, 36(8), 815-823.
- Bellot, J. P., Kroll-Rabotin, J. S., Gisselbrecht, M., Joishi, M., Saxena, A., Sanders, S., & Jardy, A. (2018). Toward Better Control of Inclusion Cleanliness in a Gas Stirred Ladle Using Multiscale Numerical Modeling. *Materials*, 11(7), 1179.
- Delzant, P. O., Chapelle, P., Jardy, A., Jourdan, J., & Millet, Y. (2019). Investigation of arc dynamics during vacuum arc remelting of a Ti64 alloy using a photodiode based instrumentation. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 10-18.
- Zollinger, J., Rouat, B., Guyon, J., Pillai, S. K., & Rappaz, M. (2019). Influence of Ir Additions and Icosahedral Short Range Order (ISRO) on Nucleation and Growth Kinetics in Au-20.5 Wt Pct Cu-4.5 Wt Pct Ag Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(5), 2279-2288.
- Gennesson, M., Zollinger, J., Daloz, D., Rouat, B., Demurger, J., & Combeau, H. (2018). Three Dimensional Methodology to Characterize Large Dendritic Equiaxed Grains in Industrial Steel Ingots. *Materials*, 11(6), 1007.
- Souhar, Y., De Felice, V. F., Beckermann, C., Combeau, H., & Založnik, M. (2016). Three-dimensional mesoscopic modeling of equiaxed dendritic solidification of a binary alloy. *Computational Materials Science*, 112, 304-317.
- Cisternas Fernández, M., Založnik, H., Combeau, U., Hecht, Thermosolutal convection and macrosegregation during directional solidification of TiAl alloys in centrifugal casting, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 154, June 2020, 119698.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

ALERTE / ENJEU N°2 : RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO2 DE LA SIDÉRURGIE

Le chiffre considérable de 7% des émissions de gaz à effet de serre anthropiques attribuables à la seule sidérurgie a été cité en introduction. Il s'agit essentiellement de CO₂, produit final de la combustion du carbone fossile largement utilisé par cette industrie, principalement sous forme de charbon. Plusieurs programmes amont de R&D associant industrie et laboratoire visant à réduire drastiquement ces émissions ont vu le jour au niveau mondial. L'IJL a ainsi pris une large part au programme européen ULCOS (2004–10) avec ses travaux sur la réduction directe par l'hydrogène et l'évaluation environnementale comparée des filières sidérurgiques. D'autres travaux ont concerné l'utilisation de biomasse au haut fourneau et une étude est en cours dans le cadre du Labex DAMAS sur l'emploi de biomasse pour la réduction directe, un procédé de rupture.

L'actualité [Voir par exemple Forbes : <https://www.forbes.com/sites/scottcarpenter/2020/08/31/swedish-steelmaker-uses-hydrogen-instead-of-coal-to-make-fossil-free-steel/> (31 août 2020)] s'invite sur ce thème. Dopée par la nécessité d'aller vers la neutralité carbone et par la reconnaissance du potentiel de l'hydrogène à tous les niveaux, quinze ans après les premiers travaux de l'IJL, l'idée d'une filière acier basée sur la réduction directe à l'hydrogène suivie de l'élaboration d'acier au four électrique refait surface. Une dizaine de programmes de R&D&I lui sont consacrés, allant jusqu'à la construction de démonstrateurs. Compte-tenu de l'ampleur de marché de l'acier, les enjeux environnementaux et économiques sont considérables.

En parallèle, des questions scientifiques restent à résoudre sur ce thème, comme (1) quelles sont les conditions de température et de compositions optimales pour mener à bien la réduction par H₂ ; (2) quel est précisément le bénéfice environnemental global de cette nouvelle filière ; (3) le fer pré-réduit décarboné produit est-il complètement adapté au four électrique ; (4) quelle est la meilleure manière de produire le dihydrogène pour cette application ? Et, plus largement, d'autres procédés décarbonés ou fondés sur la biomasse méritent d'être évalués.

L'IJL est bien placé sur ces sujets émergents et souhaite naturellement poursuivre son engagement sur ces thèmes.

Publications significatives récentes

- Patisson, O. Mirgoux "Hydrogen ironmaking: how it works" *Metals*, (2020), 10, 922. doi:10.3390/met10070922 <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/922/pdf>
- Bechara, H. Hamadeh, O. Mirgoux, F. Patisson "Carbon impact mitigation of the iron ore direct reduction process through computer-aided optimization and design changes" *Metals*, (2020), 10, 367. doi:10.3390/met10030367 <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/3/367>
- Hamadeh, O. Mirgoux, F. Patisson "Detailed modeling of the direct reduction of iron ore in a shaft furnace" *Materials*, (2018), 11, 1865, 1-16. doi:10.3390/ma11101865 <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/10/1865>
- Bechara, H. Hamadeh, O. Mirgoux, F. Patisson "Optimization of the iron ore direct reduction process through multiscale process modeling" *Materials*, (2018), 11, 1094, 1–18. doi:10.3390/ma11071094 <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/7/1094>
- Fick, O. Mirgoux, P. Neau, F. Patisson "Using biomass for pig iron production: a technical, environmental and economical assessment" *Waste and Biomass Valorization*, (2014), 5, 1, 43–55.
- Ranzani da Costa, D. Wagner, F. Patisson "Modelling a new, low CO₂ emissions, hydrogen steelmaking process" *J. Cleaner Production*, (2013), 46, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.045> <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00943356>

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

ALERTE / ENJEU N°3 : OPTIMISATION DES PERFORMANCES ET DE LA DURABILITÉ DES ALLIAGES MÉTALLIQUES INDUSTRIELS PAR LE DESIGN DES MICROSTRUCTURES

La seconde grande activité de recherche en métallurgie de l'IJL se situe après la solidification, et concerne les mécanismes de **genèse des microstructures** des alliages métalliques à l'état solide et leur **comportement en service** (durabilité). Ces travaux contribuent de manière active à la réduction de l'empreinte environnementale et énergétique des applications dans lesquelles ces alliages sont utilisés. Un des enjeux importants est l'identification de nouveaux alliages à haute performance pour l'allègement des structures dans le transport. Les travaux sur le lien entre procédés et microstructures permettront en outre une meilleure maîtrise des procédés et de leur productivité, donc de leur rentabilité énergétique. Ces travaux sont en partie aussi menés en collaboration directe avec les partenaires industriels.

On s'intéresse principalement aux procédés thermomécaniques métallurgiques amont (comme par exemple le forgeage, le laminage...) [5] ainsi que les traitements thermochimiques (traitements thermiques notamment comme le recuit continu ou les revenus). Bien entendu, des interactions fortes existent avec la thématique précédente, qui concerne la formation des microstructures lors des processus de solidification et de leur complexité (hétérogénéités chimiques, contraintes, dé

Cette activité se décline en plusieurs axes de recherche complémentaires et en fortes interactions :

Compréhension et prédiction de la formation des microstructures à l'état solide au cours de traitements thermiques et thermomécaniques

Nous nous intéressons à une très large gamme de mécanismes métallurgiques, allant de la restauration aux transformations de phases (diffusives ou displacives) en passant par la précipitation et la recristallisation, et à toutes leurs nombreuses interactions. Nous étudions en particulier les contraintes internes qui se développent à l'échelle des phases lors de ces évolutions ainsi que les contraintes internes/résiduelles à l'échelle de la pièce. Les travaux expérimentaux comme de modélisation numérique sont principalement menés sur des alliages industriels « dernière génération » après des sollicitations souvent sévères (chauffage/refroidissement très rapides, sollicitation thermomécanique) [6]. Ils présentent donc des microstructures de plus en plus complexes : elles sont multiphasées, avec des constituants de tailles nanométriques, dont la distribution topologique en 3D, morphologique et cristallographique impacte fortement le comportement mécanique. Il s'agit par exemple d'études menées sur les aciers AHSS (Advanced High Strength Steels) de 3^{ème} génération [6] avec les groupes ArcelorMittal et Ascométal, les aciers enrichis en carbone et azote avec l'IRT M2P (PSA, Ascométal, Safran ...), les alliages de titane avec Safran et Airbus, les intermétalliques avec le CTIF, les composites à matrice métalliques Fe-TiB2 avec ArcelorMittal, les HEA (High Entropy Alloys) avec Suturex...

Ces microstructures sont particulièrement difficiles à caractériser avec des techniques de microscopies conventionnelles et nécessitent donc l'utilisation et le développement de moyens spécifiques pour étudier ces alliages à différentes échelles et en 3D. Ces travaux seront rendus possibles grâce à de fortes complémentarités existantes entre le LEM3 et l'IJL dans ce domaine (notamment dans le cadre du Labex DAMAS). Au cours des années passées, nos travaux ont pu bénéficier de l'accès aux grands instruments, notamment de l'utilisation de la DRXHE (Diffraction des Rayons X Haute Energie) [7] sur ligne de lumière synchrotron. Le développement d'expériences in situ spécifiques et uniques est l'une des clefs du succès de cette activité et sera fortement renforcé dans le futur.

En parallèle de ces travaux expérimentaux, des travaux de modélisation et de simulation numérique multi-échelles couplées continueront à être développés pour prédire par des approches atomistiques

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

(ab initio, dynamique moléculaire), thermocinétiques locales (champs de phases) ou à champs moyens l'évolution des microstructures et contraintes internes au cours de procédés de traitements thermiques et thermomécaniques, soit à l'échelle d'un VER (Volume Élémentaire Représentatif), soit à l'échelle macroscopique de l'application. Ces approches pourront aussi être mises en œuvre dans les nouveaux procédés comme la fabrication additive par exemple. Ces outils de plus en plus complexes nécessiteront des ressources numériques importantes en particulier dans le cadre du mésocentre EXPLOR.

Etude des mécanismes élémentaires du comportement plastique en condition d'usage

Afin de comprendre et maîtriser le comportement mécanique des microstructures métalliques complexes, il est indispensable de s'intéresser aux mécanismes élémentaires de la déformation plastique (dislocations) des phases, en particulier à haute température. Il s'agit par exemple des mécanismes de déformation des superalliages monocristallins utilisés à haute température (950°C-1150°C) dans les réacteurs aéronautiques, les aciers au chrome utilisés en centrale thermiques (collaboration avec l'Institut de Soudure) mais aussi aux aciers plus conventionnels produits par coulées continues dont certaines brames peuvent fissurer durant leur refroidissement (collaboration ArcelorMittal /Nippon Steel). Les perspectives dans ce domaine sont nombreuses et de potentiels sujets de recherche émergent aussi sur les aciers AHSS de 3^{ème} génération, les alliages de titane ou les alliages à haute entropie.

Les moyens expérimentaux nécessaires à ces recherches consistent principalement en machines d'essai mécaniques simples instrumentés spécifiquement, permettant des caractérisations thermomécaniques in situ en particulier par DRXHE sur grands instruments [7] ou en conditions extrêmes. Ces études utilisent aussi largement des techniques de microscopies, en particulier la MET pour caractériser les microstructures de dislocations.

Comportement micromécanique en service des microstructures complexes

En service, les microstructures multiphasées sont le siège d'incompatibilités de déformation conduisant à leur endommagement. En effet, ces incompatibilités induisent des contraintes internes et des relaxations plastiques qui dépendent fortement de la morphologie, de la topologie et de l'orientation des phases. Des modèles micromécaniques à champs locaux et à champs moyens, sont développés pour simuler les états locaux de contraintes et de déformation et/ou moyens par grains ou par orientation. Cette approche de métallurgie numérique doit permettre de mieux comprendre le comportement de ces microstructures en service et de développer des codes numériques rapides à large pouvoir prédictif.

Références bibliographiques générales

5. Massardier, V.; Gouné, M.; Fabrègue, D.; Selouane, A.; Douillard, T. & Bouaziz, O. *Evolution of microstructure and strength during the ultra-fast tempering of Fe-Mn-C martensitic steels* *Journal of Materials Science*, Springer Nature, 2014, 49, 7782-7796.
6. Fonstein, N. (2015). *Advanced high strength sheet steels* (p. 369). Switzerland: Springer International Publishing.
7. Liss, K.-D. & Yan, K. *Thermo-mechanical processing in a synchrotron beam* *Materials Science and Engineering A*, 2010, 528, 11-27

Publications significatives récentes

- Moreno, M., Teixeira, J., Geandier, G., Hell, J. C., Bonnet, F., Salib, M., & Allain, S. (2019). *Real-Time Investigation of Recovery, Recrystallization and Austenite Transformation during Annealing of a Cold-Rolled Steel Using High Energy X-ray Diffraction (HEXRD)*. *Metals*, 9(1), 8.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

- Allain, S. Y. P., Gaudez, S., Geandier, G., Hell, J. C., Gouné, M., Danoix, F., ... & Poulon-Quintin, A. (2018). *Internal stresses and carbon enrichment in austenite of Quenching and Partitioning steels from high energy X-ray diffraction experiments. Materials Science and Engineering: A, 710, 245-250.*
- Nejezchlebová, J., Seiner, H., Sedlák, P., Landa, M., Šmilauerová, J., Aeby-Gautier, E., ... & Appolaire, B. (2018). *On the complementarity between resistivity measurement and ultrasonic measurement for in-situ characterization of phase transitions in Ti-alloys. Journal of Alloys and Compounds, 762, 868-872.*
- Van Landeghem, H. P., Catteau, S. D., Teixeira, J., Dulcy, J., Dehmas, M., Courteaux, M., ... & Denis, S. (2018). *Isothermal decomposition of carbon and nitrogen-enriched austenite in 23MnCrMo5 low-alloy steel. Acta Materialia, 148, 363-373.*

5-3 Vers l'éco-conception et la géo-conception de nouveaux alliages métalliques

Franck Tancret, Université de Nantes

Mots Clefs : écoconception, alliages métalliques

CONSTAT POST COVID SUR LE THÈME

L'Âge du Bronze, l'Âge du Fer, la Révolution Industrielle : la métallurgie a accompagné les grandes étapes de développement de l'Humanité. On la retrouve aujourd'hui omniprésente dans tous les secteurs de pointe : transports, énergie, technologies numériques, agroalimentaire, santé... Les progrès visibles des capacités technologiques de la société ont toujours reposé en partie sur le développement, plus discret, de nouveaux matériaux métalliques. Ces derniers, simples au départ dans leur composition –du cuivre et de l'étain pour le bronze, du fer et du carbone pour l'acier–, se sont progressivement complexifiés pour intégrer des éléments de plus en plus nombreux. Les aciers inoxydables inventés au début du XX^{ème} siècle reposaient au départ sur des mélanges de fer, de chrome, de nickel et de carbone ; la famille des superalliages à base de nickel peut aujourd'hui intégrer une vingtaine d'éléments chimiques et certains alliages en contiennent une douzaine à eux seuls. Cette complexification a jusqu'à présent été principalement dictée par l'obtention de performances fonctionnelles –propriétés mécaniques, densité, tenue en température, résistance à la corrosion, facilité de mise en œuvre, etc– et par le prix. Les métaux nécessaires à la fabrication des alliages modernes semblent parfois assez « exotiques » au commun des mortels : zirconium, niobium, molybdène, ruthénium, hafnium, tantale, tungstène... S'ils le sont, c'est que certains sont rares et chers ; s'ils sont rares et chers, c'est parfois parce que leur approvisionnement est délicat, qu'ils viennent de loin ou de zones « sensibles », qu'il faut déployer des moyens importants et néfastes pour l'environnement pour les extraire, les purifier et les acheminer, que leur disponibilité sera limitée dans le temps et, qu'en conséquence, les marchés sont tendus. Plusieurs stratégies seraient potentiellement envisageables pour limiter l'impact de ces facteurs.

ALERTE / ENJEU N°1 : SÉCURISER LA DISPONIBILITÉ DES MÉTAUX CLEFS

Recommandation/ Proposition N°1 : Remplacer les alliages métalliques par d'autres catégories de matériaux qui s'avèreraient moins impactants et/ou plus disponibles. Si cela peut être envisagé dans certains cas, les combinaisons de caractéristiques offertes par les métaux (tenue mécanique, déformabilité, résistance à la fissuration ou aux chocs, tenue en température, coût, recyclabilité...) demeurent incontournables dans de très nombreuses situations. La métallurgie reste et restera donc indispensable.

Recommandation/ Proposition N°2 : Optimiser les procédés d'extraction, d'élaboration, de mise en forme et de recyclage en termes d'efficacité énergétique et de rejets polluants afin d'en minimiser les conséquences environnementales.

Les propositions 1 et 2 relèvent plutôt de l'ingénierie : ingénierie de la conception des objets dans le cas 1, par exemple avec une approche de type « Ashby » associant conception fonctionnelle et sélection des matériaux ; ingénierie des procédés industriels dans le cas 2. Ces voies ont été et sont encore largement explorées par des communautés assez développées, comme en témoignent la publication d'ouvrages spécialisés (e.g. M.F. Ashby, *Materials and the environment – Eco-informed material choice*) et de périodiques scientifiques (e.g. *Recycling* ou *Journal of Sustainable Metallurgy*) ou la tenue de conférences dédiées (e.g. *REWAS* ou *European Recycling Conference*).

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Recommandation/ Proposition N°3 : Utiliser des sources de matières « *intrinsèquement* » moins impactantes et/ou moins risquées, qu'il s'agisse de matières premières ou issues du recyclage.

La proposition 3 est en partie pris en compte par les industries métallurgiques, qui cherchent notamment à sécuriser leurs approvisionnements, que ce soit sur le plan de la disponibilité (sources multiples, fiables et pérennes) ou économique (prix des matières premières et leur volatilité sur les marchés). En revanche, il ne semble pas exister d'approche de développement de nouveaux matériaux métalliques prenant explicitement en compte ces stratégies, à l'aide d'une conception d'alliages rationnelle en amont, notamment sur les volets environnementaux.

ALERTE / ENJEU N°2 : APPLIQUER LES PRINCIPES DE L'ÉCO-CONCEPTION ET DE LA GÉO-CONCEPTION D'ALLIAGES

Recommandation/ Proposition : L'idée de base consiste à essayer de minimiser, dès l'étape de conception des alliages, l'impact environnemental et le risque d'approvisionnement des matières premières, c'est-à-dire des métaux entrant dans la composition des alliages. Il s'agit de prendre en compte toute la chaîne de production, de la mine à l'obtention des métaux purs utilisés par les élaborateurs d'alliages, ainsi que les opportunités de recyclage, que ce soit en amont (possibilité d'intégrer des nuances existantes recyclées dans les nouveaux alliages) ou en aval (possibilité d'intégrer les futurs alliages en fin de vie dans des nuances existantes). Si le concept a déjà été évoqué par ailleurs (e.g. <http://darealloys.org>), il ne semble pas avoir été exploité de manière rationnelle, c'est-à-dire en en faisant une évaluation chiffrée, explicitement prise en compte dans la conception. Un tel chiffrage devrait pourtant être réalisable – ce point sera discuté ultérieurement – dans la mesure où, par exemple, des indicateurs numériques existent pour quantifier l'empreinte carbone, l'énergie ou la consommation en eau associées à la production d'un kilogramme d'un métal donné [e.g. Nuss et al., *PLoS One*, 9 (2014) 1]. D'autres critères quantitatifs permettent d'évaluer la criticité des différents métaux en termes d'importance économique, de volatilité des prix sur les marchés ou de sécurité d'approvisionnement, en s'appuyant par exemple sur le nombre de sources potentielles de chaque métal, sur la stabilité politique des pays producteurs, etc. [e.g. European Commission, *Methodology for establishing the EU list of critical raw materials*, 2017]. La possibilité de recyclage se heurte, quant à elle, à la variété des éléments d'alliage entrant dans la composition des matériaux, la fabrication d'un alliage B ne pouvant faire appel à un alliage recyclé A que si tous les éléments de A sont présents dans B. Des travaux préliminaires, présentés ci-dessous, montrent la faisabilité d'une approche de conception d'alliages prenant en compte les aspects susmentionnés.

Références : Travaux et Résultats préliminaires sur la géoconception

Le développement de nouveaux alliages a souvent été fait de manière empirique expérimentale, par essais-erreurs, ce qui est long et coûteux. Au cours des dernières décennies, la modélisation et la simulation ont fait leur entrée dans le domaine et y prennent une part grandissante, ce qui permet d'accélérer la conception de nouveaux matériaux. Les modèles permettant de prédire les caractéristiques des matériaux peuvent être de nature physique (e.g. l'usage maintenant généralisé de la méthode Calphad –CALCulation of PHase Diagrams– pour prédire certaines caractéristiques microstructurales) mais également, comme démontré depuis plus d'une vingtaine d'années, faire appel à des outils de fouille de données (data mining / machine learning) issus de l'intelligence artificielle (IA), tels que les réseaux neuronaux ou les processus gaussiens. Toutefois, comme souligné dans l'introduction, le grand nombre d'éléments entrant dans la composition des alliages modernes conduit à un nombre gigantesque de matériaux potentiels qu'il n'est pas possible d'embrasser pleinement sans avoir recours à des méthodes informatisées telles que, par exemple, l'optimisation multi-objectifs par algorithme génétique, là encore en provenance du monde de l'IA. L'optimisation multi-objectifs est ici intéressante en ce qu'elle permet de trouver les meilleurs compromis possibles

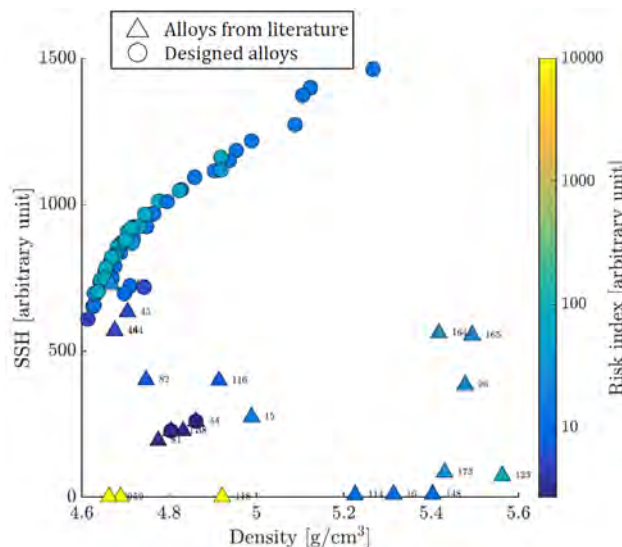
Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

entre plusieurs caractéristiques recherchées, conduisant à un ensemble de solutions optimales dites « de Pareto ». De telles méthodes de conception d'alliages, associant modèles physiques, machine learning et optimisation multi-objectifs, sont arrivées à maturité il y a quelques années avec par exemple l'optimisation simultanée, par algorithme génétique, de plusieurs propriétés mécaniques prédites par fouille de données et de caractéristiques microstructurales évaluées par la méthode Calphad [e.g. Menou et al., *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.*, **24** (2016) 055001].

L'objectif ici poursuivi est d'intégrer, parmi les critères à optimiser, des indicateurs chiffrés relatifs à l'impact environnemental et au risque d'approvisionnement des métaux, ainsi qu'à la possibilité d'avoir recours au recyclage. Quelques exemples de travaux préliminaires et de résultats associés sont présentés ci-après.

Le premier exemple concerne la conception d'alliages de titane dits « β -métastables » à effet « TRIP » (TRansformation-Induced Plasticity), c'est-à-dire dans lesquels une partie de la déformation irréversible est accompagnée d'une transformation martensitique ; ce comportement permet d'obtenir des matériaux à la ductilité améliorée et présentant un fort écrouissage, c'est-à-dire un durcissement prononcé sous l'effet d'une déformation plastique. Un modèle a été développé permettant de prédire l'occurrence de l'effet TRIP dans les alliages de titane [M. Bignon, *Thèse de l'Université de Nantes*, 2020]. Toutefois, la plupart de ces alliages possèdent une limite d'élasticité modeste, qui pourrait être augmentée grâce à un renforcement par effet de solution solide, que l'on peut là encore prédire à l'aide d'un modèle physique. Ainsi, concevoir des alliages plus durs, facilement écrouissables et très ductiles serait en soi un objectif industriel intéressant. De surcroît, une diminution de la densité des alliages est généralement souhaitable, en particulier dans le domaine des transports, où des structures plus légères permettent d'abaisser la consommation de carburant et donc la pollution résultante. Mais l'impact environnemental des matériaux eux-mêmes, via l'empreinte carbone des éléments entrant dans leur composition, peut aussi être optimisée. Le risque de rupture d'approvisionnement est aussi un aspect à prendre en compte dans une approche industrielle stratégique. Un critère de risque peut ainsi être calculé pour un alliage donné en fonction de sa composition, en prenant en compte les risques d'approvisionnement de chacun des éléments tels que définis par la Commission européenne.

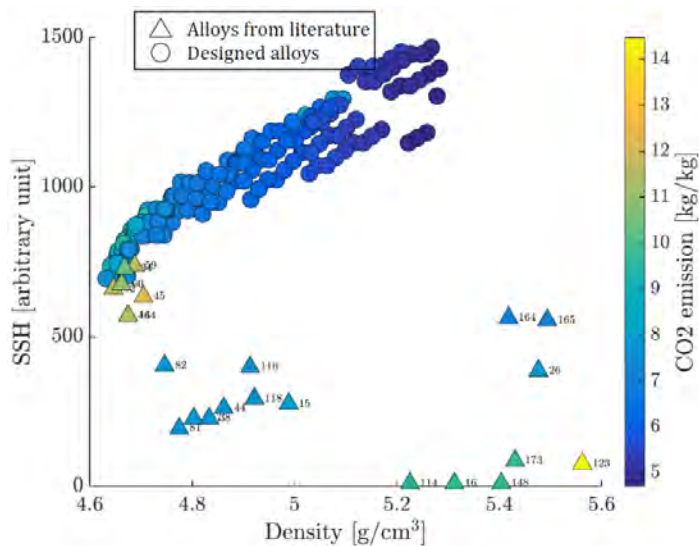
La figure suivante présente un tel cas d'optimisation multi-objectifs par algorithme génétique, où des alliages de titane à effet TRIP ont été conçus de manière à simultanément augmenter leur renforcement par solution solide (SSH, échelle de gauche), abaisser leur densité (échelle du bas) et diminuer le risque d'approvisionnement en matières premières (code couleur à droite) [M. Bignon, *ibid.*] :



Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

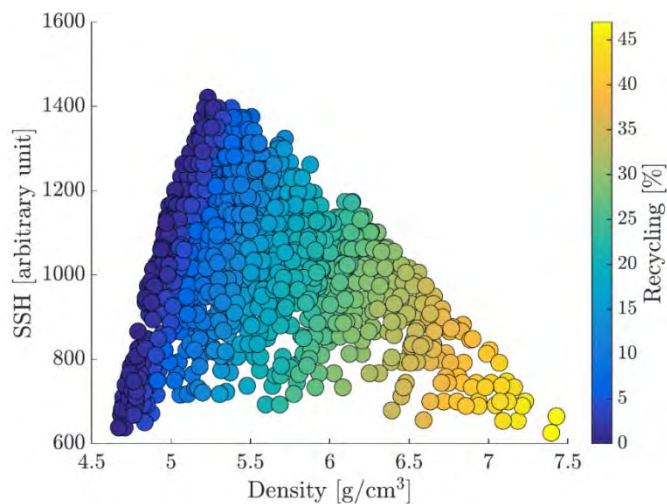
On constate qu'il est possible de concevoir des alliages (cercles) à effet TRIP présentant des combinaisons avantageuses de durcissement par solution solide, de densité et de risque d'approvisionnement, par rapport aux alliages à effet TRIP existants (triangles).

L'exemple suivant reprend les mêmes critères techniques de conception (effet TRIP, renforcement et densité) mais en cherchant cette fois à limiter l'empreinte carbone ; il s'agit donc ici d'une approche environnementale. Les résultats sont présentés sur la figure ci-après avec le même type de représentation que précédemment [M. Bignon, *ibid.*] :



Par exemple, pour les plus faibles densités –qui permettent en outre de réduire l'impact énergétique des applications–, à résistance équivalente les alliages conçus affichent une empreinte carbone réduite de l'ordre de 30% par rapport aux alliages existants, indiquant une marge significative d'amélioration sur le plan environnemental.

Le recyclage peut également être pris en compte explicitement lors de l'étape de conception de nouveaux alliages. Par exemple, on peut tenter de concevoir des alliages que l'on fabriquera à partir de mélanges de nuances existantes recyclées, dont la fraction totale est la plus grande possible pour maximiser le recours au recyclage, que l'on complètera au besoin avec des éléments d'alliage individuels. L'exemple ici présenté a consisté à tenter la conception d'alliages de titane à effet TRIP à partir de mélanges de sept nuances existantes. La représentation des résultats, ci-dessous, reprend le principe précédent : renforcement par solution solide en fonction de la densité, la couleur représentant la fraction totale d'alliages recyclés entrant dans la composition des nouveaux matériaux :



Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

La fraction recyclée ne monte ici pas très haut (47% maximum), et la résistance calculée des alliages faisant le plus appel au recyclage est la plus faible, quoiqu'étant notablement supérieure à celle de nombreux alliages existants (cf. triangles sur les figures précédentes). Bien entendu, le résultat dépend du panel sélectionné d'alliages à recycler : il a ici été choisi de manière un peu arbitraire, mais une analyse plus fine permettrait, par exemple, de favoriser les nuances les plus produites ou les plus disponibles chez les recycleurs, ce qui demanderait une analyse plus poussée en termes d'économie circulaire. Des calculs semblables ont été réalisés dans le cas de la conception de superalliages à base de nickel, en n'autorisant que trois des nuances les plus courantes, à savoir les alliages 600, 625 et 718. Des propriétés calculées supérieures à la plupart des superalliages polycristallins ont été obtenues, même avec des fractions recyclées de l'ordre de 95% [Tancret et al., *Matériaux 2018*, Strasbourg].

CONCLUSION ET PERSPECTIVES : NÉCESSITÉ D'UNE APPROCHE INTERDISCIPLINAIRE

Les méthodes ici exposées, bien qu'exploratoires, permettent d'envisager une conception d'alliages réduisant notablement l'impact environnemental et le risque géostratégique d'approvisionnement des industries métallurgiques. À partir de ce constat prometteur mais préliminaire, diverses perspectives peuvent être dégagées pour approfondir les recherches :

- L'approche de conception stratégique ici exposée fait appel à des critères de risque basés sur le risque individuel d'approvisionnement de chaque élément d'alliage, en s'appuyant sur des indices de criticité établis par la Commission européenne. Cela permet de minimiser le risque global lié à un alliage, mais n'élimine pas le risque et ne résout donc pas le problème en cas de tarissement effectif de la source d'un élément (que ce soit pour des raisons géologiques ou géopolitiques). La Commission européenne propose par ailleurs une autre manière d'évaluer la criticité d'un métal, en considérant sa substituabilité, c'est-à-dire la possibilité de le remplacer par un autre, mais il semble que cette approche est axée sur la possible substitution d'un matériau par un autre pour la fabrication d'objets. Il serait intéressant d'étendre ce principe à la substituabilité d'un élément au sein d'un alliage. Par exemple, il serait envisageable de concevoir tous les alliages possibles présentant un ensemble de propriétés équivalentes (résistance, ductilité, densité...), mais élaborés à partir de jeux d'éléments différents, afin de parer à l'éventuelle rupture d'approvisionnement de l'un ou l'autre d'entre eux. Une telle stratégie demanderait à développer des outils algorithmiques spécifiques pour la conception.
- Concernant le recyclage, les résultats ici présentés concernent des cas idéaux de recyclage « propre », c'est-à-dire où la pureté et la qualité des matériaux peut être maintenue, ce qui reste difficile à gérer à l'heure actuelle. En effet, la nature même des filières et procédés de recyclage fait que les alliages récupérés sont souvent « pollués » par d'autres matériaux, issus entre autres des pièces qui constituaient les objets démantelés, en raison du difficile désassemblage des différents constituants desdits objets. À ce titre, on peut notamment penser à la présence de cuivre dans les aciers recyclés provenant de circuits électriques (automobile, électro-ménager...) ou encore à l'incorporation de fer dans les alliages d'aluminium recyclés suite à une mauvaise séparation de pièces voisines en acier. Il pourrait ainsi être intéressant de concevoir, en amont, des alliages « tolérants aux pollutions », c'est-à-dire par exemple des aciers ou des alliages d'aluminium dont les propriétés sont peu sensibles à des variations de teneurs en cuivre ou en fer, respectivement.
- L'approche de conception par recyclage ici présentée ne concernait que l'incorporation, dans les nouveaux matériaux, de nuances recyclées, afin de favoriser la valorisation en fin de vie des alliages actuellement sur le marché et de minimiser le recours aux métaux primaires. Il serait cependant utile de prendre également en compte le recyclage futur des alliages conçus, de sorte qu'ils puissent à leur tour être facilement intégrés en fin de vie dans la fabrication

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

d'autres alliages. Cela pourrait se faire en forçant la conception des nouveaux alliages à n'intégrer que les éléments présents dans les nuances actuelles les plus abondamment produites.

- La minimisation de l'impact environnemental des alliages, ici abordée de manière préliminaire, ne concerne que la production des métaux entrant dans leur composition, autrement dit l'activité minière (extraction, traitement des minerais...) et la métallurgie primaire (réduction, purification des métaux...), mais :
 - Le transport des matières entre les différents sites de transformation mériterait d'être intégré dans l'analyse (par exemple, sur ce seul critère, mettre du niobium dans un alliage est probablement moins impactant au Brésil que presque partout ailleurs).
 - La prise en compte de l'ensemble de la chaîne de production, notamment à travers les procédés de métallurgie secondaire visant à obtenir des semi-produits ou des produits métalliques, serait également pertinente (fusion, coulée, laminage, forgeage, fabrication additive, traitements thermiques...). C'est ici essentiellement le coût énergétique qui serait concerné, ce dernier dépendant notamment, pour un procédé donné, des températures mises en jeu et des durées de traitement associées. Ces aspects sont assez fortement couplés à la composition des alliages et mériteraient donc une prise en compte explicite dès l'étape de conception des matériaux. Entre autres, la composition des alliages impacte notablement leurs enthalpie et température de fusion, mais également les températures et durées de différentes étapes de traitement thermique ou thermomécanique. Par exemple, en exploitant un modèle prédictif de la recristallisation dynamique des alliages de nickel prenant en compte leur composition [Tancret et al., *Des.*, **103** (2016) 293], il a été possible de concevoir des alliages aux performances élevées mais pouvant être forgés sur des temps courts (via une augmentation de la vitesse de déformation) et à température réduite [Menou et al., *JA SF2M*, Albi, 2016]. Une telle optimisation reste toutefois incomplète et une prise en compte explicite de la consommation énergétique des procédés serait nécessaire.
 - Il est évident qu'un matériau dont la fabrication est sobre en énergie perdrait tout intérêt si son utilisation générerait une augmentation plus importante de la consommation énergétique associée et, inversement, un matériau optimisant les performances énergétiques de l'objet qu'il intègre (via par exemple des gains en masse grâce à une densité réduite et/ou à une résistance accrue) permettrait de justifier un impact plus grand lors de sa production. De tels principes [e.g. Cann et al., *Mater. Sci.* (2020), doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100722] appellent ainsi une approche basée sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) complète du matériau, depuis le minerai jusqu'au recyclage en passant par toutes les étapes de transformation, de transport et d'utilisation : *in fine*, c'est l'impact de l'ensemble qu'il faudra minimiser, la composition de l'alliage ayant un rôle majeur à y jouer, notamment via les concepts exposés dans le présent article.

Si une stratégie d'éco-conception et de géo-conception d'alliages semble envisageable comme le démontrent les premiers éléments de preuve de concept ici exposés, elle ne sera efficace que dans le cadre de programmes de recherches interdisciplinaires, à la croisée de l'ingénierie et des sciences physiques et humaines :

- Géostratégie / géopolitique
- Géologie / ressources et exploitation minières
- Métallurgie primaire et secondaire (énergétique des procédés)
- Métallurgie physique (prédiction des microstructures et propriétés)
- Environnement (pollution, empreinte carbone...) et réglementation

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

- Économie / marchés
- Recyclage / économie circulaire / ACV
- Informatique (machine learning, optimisation...)...

5-4 Construction et Environnement

Sylvain Meille, Équipe Céramiques et Composites, laboratoire MATEIS INSA Lyon

Mots Clefs : isolation, construction, environnement

CONSTAT POST COVID SUR LE THÈME

Une diminution quantitative notable des émissions de CO₂ est absolument nécessaire. De nombreuses actions rendues très visibles sur l'allègement de structures ne représentent en réalité qu'un gain epsilonesque en termes de quantité de gaz à effet de serre. Une des sources principales d'émission concerne le bâtiment avec des pistes de travail sur l'isolation pour réduire l'énergie de chauffage (ainsi que celle de climatisation) ainsi que sur la diminution du coût énergétique de production des matériaux de construction (énergie « grise »).

Plusieurs thématiques de recherche paraissent évidentes (mais pour lesquelles les financements sont toujours délicats à obtenir)

ALERTE / ENJEU N°1 : DÉVELOPPER DE NOUVEAUX MATÉRIAUX À TRÈS FORTE CAPACITÉ D'ISOLATION (TYPE AÉROGELS OU ISOLANTS SOUS-VIDE)

Recommandation/ Proposition : Des actions de recherche existent dans les laboratoires français, malheureusement EDF a fermé son laboratoire Matériaux pour l'efficacité énergétique et arrêté les actions du labo commun MATE'B avec MATEIS. Plusieurs pistes de travail sont à viser : réduire le coût de solutions actuelles qui fonctionnent au laboratoire mais restent trop coûteuses et nécessitent un changement d'échelle pour passer réellement en phase de développement industriel, et améliorer encore les capacités de super-isolation pour atteindre des épaisseurs « raisonnables » d'isolants, permettant d'apporter une excellente isolation (toitures-terrasses) et de limiter les ponts thermiques (volets roulants). Les matériaux de base de ces isolants sont relativement simples (silice précipitée, matériaux organiques issus de l'agriculture) et peuvent être sourcés localement.

ALERTE / ENJEU N°2 : DÉVELOPPER UNE FILIÈRE DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION À PLUS FAIBLE EMPREINTE CARBONE

Recommandations/Proposition : La fabrication du béton (surtout la part liée à la fabrication du ciment) compte pour 6% des émissions totales mondiales de CO₂ (la « tranche du gâteau » la plus importante pour domaine donné, avec la sidérurgie) ! Pour de très nombreux bâtiments, le niveau de résistance du béton est très largement supérieur à ce qui est requis. C'est souvent la seule filière existante et donc cela limite les choix de systèmes constructifs. Il convient de développer des matériaux à très faible énergie grise, comme la terre crue (argile) qui ne nécessite pas de cuisson (contrairement à la terre cuite qui est défavorable en termes d'énergie grise en comparaison au béton). La stabilisation de la terre cure afin de donner une résistance au jeune âge doit permettre de faciliter son utilisation. Plusieurs pistes sont envisageables : ajout de laitier de sidérurgie, géopolymères.... L'utilisation de matériaux issus du recyclage ou de fines de carrières compactés pour fabriquer des éléments de préfabrication (briques, plaques) est également une opportunité avec un potentiel de gain de CO₂ très important. Fines argilo-calcaire, carbonates de calcium, granulats de béton broyé... sont des pistes d'étude à suivre.

La durabilité de ces matériaux reste évidemment à caractériser mais ne doit pas être vue comme un « point faible » potentiel mais comme un domaine d'étude qui n'a été que très peu exploré.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

ALERTE / ENJEU N°3: DÉVELOPPER DES MATÉRIAUX À « CAPACITÉ DE GUÉRISON » POUR DES SOLUTIONS PLUS DURABLES

Recommandation/ Proposition : Le développement de matériaux multifonctionnels permet d'augmenter leur valeur ajoutée, valorisant ainsi une production locale. Des matériaux de structure présentant une capacité de guérison suite à un endommagement (impact, choc thermique...) offrent une opportunité de ré-emploi et donc de gain environnemental fort. Au-delà de l'auto guérison qui limite drastiquement le niveau de résistance mécanique et donc les applications potentielles comme matériaux de structure, la **guérison sous stimulus** (électrique / magnétique...) offre des perspectives dans de nombreux domaines (santé, structures...).

5-5 Recyclage co-produits et déchets de la métallurgie

Jean-François Pierson – Institut Jean Lamour, Département CP2S

Mots Clefs : Métallurgie, co-produits, recyclage, matériaux pour le génie civil, énergie, hydrométallurgie

Les **liants hydrauliques du génie civil présentent un potentiel intéressant pour recycler des co-produits et des résidus de l'industrie métallurgique**. Il est en effet possible d'exploiter le caractère hydraulique plus ou moins prononcé de certains produits (les laitiers) et de **substituer une partie des granulats naturels** ce qui contribue dans tous les cas à diminuer l'impact environnemental.

Depuis plusieurs décennies les **laitiers de hauts-fourneaux sont réutilisés dans l'industrie cimentière** pour produire des ciments composés de types CEMII et CEMIII, où ils peuvent représenter jusqu'à 95% de substitution du clinker Portland (très gros générateur de CO₂). Mais ces laitiers peuvent également être utilisés comme ajout dans la fabrication des bétons et on recherche actuellement à valoriser par cette voie des laitiers moins réactifs (laitiers d'aciéries, laitiers de poche). Les laitiers font également l'objet de nombreuses recherches actuelles quant à leur utilisation dans de nouveaux matériaux de type géopolymères.

Outre la production de fonte et d'acier, les activités de coulage génèrent elles-aussi de grandes quantités de **résidus sous forme de sables (et fines de sables) usagés de fonderie**. Ces produits font l'objet de recherches pour permettre leur **réutilisation et leur inertage** (problème de leurs teneurs en divers métaux et produits organiques insaturés) dans les bétons. Dans un contexte mondial de pénurie en sable, les fonderies (industrie automobile en tête) produisent plusieurs dizaines de millions de tonnes annuelles de ce déchet.

Si la pyrométallurgie assure l'essentiel de la production de métaux au niveau mondial (acier, cuivre, plomb, titane, molybdène tungstène...) **certains métaux sont cependant produits par voie hydrométallurgique**. Parmi les métaux dits de base, c'est le cas du **zinc** dont la production par cette voie atteint 90 % contre 10 % pour le procédé pyrométallurgique Imperial Smelting. C'est également le cas du **cuivre** dont 20 % de la production mondiale est assurée par hydrométallurgie à partir notamment de la malachite Cu₂(CO₃)(OH)₂ ou celui du nickel élaboré par ERAMET à Sandouville à partir des mattes provenant de Nouvelle-Calédonie. L'avantage majeur de l'hydrométallurgie par rapport à la pyrométallurgie se situe au niveau de la **dépense énergétique des procédés**. Les opérations hydrométallurgiques sont généralement réalisées à des températures proches de l'ambiante (à l'exception des métaux produits par électrolyse en milieu sel fondu comme l'aluminium ou le sodium). Le métal est obtenu par électrolyse, cette opération clé de l'hydrométallurgie pouvant également être utilisée pour le raffinage de métaux produits par voie pyrométallurgique comme le plomb ou le cuivre dans des procédés à anode soluble. **L'hydrométallurgie permet également de valoriser des minerais complexes multiéléments et notamment d'y récupérer des métaux dits mineurs** comme l'indium (présent dans la blende ZnS) ou le gallium présent à l'état de traces dans les bauxites. Enfin, **l'hydrométallurgie est une technique de choix en ce qui concerne la valorisation des déchets** miniers, des déchets industriels et des produits en fin de vie constituant ce que l'on a coutume d'appeler la mine urbaine.

Au-delà du recyclage des coproduits métallurgiques, la **production de ciment** (supérieure à 4,2 milliards de tonnes par an en 2014) génère une **part importante du CO₂ émis** (estimé à environ 8% des rejets mondiaux annuels, en 2008). La production du clinker Portland, par cuisson à 1450°C, constitue un poste important de dégagement de CO₂ (décarbonatation du calcaire entrant dans le cru et énergie de chauffage du four), suivi par le broyage du ciment. Les pistes de **réduction des émissions de CO₂ passent par la production de nouveaux ciments** de type sulfo-alumineux (température de

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

cuisson moindre, utilisation de moins de calcaire), un recours accru à des ciments composés encore plus performants, et de **nouveaux procédés de broyage plus économes en énergie**.

5-6 Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages métalliques

Lola Liliensten¹, Mathilde Laurent-Brocq²

¹ : Institut de Recherche de Chimie Paris, Chimie ParisTech, CNRS, PSL Research University, Paris, 75005, France

² : Université Paris Est Créteil, CNRS, ICMPE (UMR 7182), Thiais, France,

Mots Clefs : recyclage, métaux, alliages, procédés, conception, propriétés, impuretés

Constat Post COVID sur le thème

La production mondiale d'acier et d'aluminium pour l'industrie représente une consommation d'énergie avoisinant les 53.10^{18} J, soit environ 8% de l'énergie mondiale et 30% des émissions industrielles de CO₂. Ces deux alliages de structure sont aussi présents dans les domaines du transport et de la construction, dont l'empreinte carbone est également considérable (chaque domaine émettant plus de 7 GtCO₂ en 2012, pour environ 10 G tCO₂ pour l'industrie dans son ensemble) (Allwood & Cullen, 2012).

Afin de réduire les émissions de CO₂ pour limiter le réchauffement climatique, suivant les objectifs de 40% de réduction des émissions pour 2030 par rapport aux niveaux de 1990 émis par l'Union Européenne (*2030 Climate & Energy Framework (European Commission)*, n.d.), il est donc primordial que la métallurgie, tout comme les autres secteurs, s'empare de ces aspects. Ceci est d'autant plus urgent que la demande en matériaux de structure des pays émergents augmente.

Plusieurs approches devront sans aucun doute être implémentées en parallèle pour parvenir à faire diminuer ces émissions de carbone. Elles imposent d'agir à chaque étape du cycle de fabrication et de production des alliages, des minerais jusqu'au recyclage final des produits, et de développer de nouveaux alliages plus durables : incorporant une quantité d'alliages recyclés supérieure, recyclable et à la durée de vie allongée (plus résistant mécaniquement, plus léger, moins sensible à la corrosion) (Raabe et al., 2019).

Cette contribution se concentre plus spécifiquement sur les aspects de recyclage. En effet, contrairement à d'autres matériaux, les métaux et alliages ont l'avantage de pouvoir être recyclés théoriquement à l'infini. Cependant, la part de matière recyclée dans la production totale est de seulement 45% pour l'acier et 30% pour l'aluminium, ce qui laisse une grande marge d'amélioration (Raabe et al., 2019). Le recyclage est pourtant souhaitable, considérant que la production d'une tonne d'alliage d'aluminium à base d'alliage recyclé consomme seulement environ 5 à 8% de l'énergie nécessaire à la production d'aluminium à partir de la bauxite (Choate & Green, 2004; Zhang et al., 2016).

Plusieurs verrous existent : les premiers sont sociétaux, comme les incitations au recyclage par des mesures (inter)gouvernementales et des taxes carbonées, et la mise en place de filières. Les seconds sont industriels : les aspects de démontabilité, récupérabilité puis *in fine* recyclage sont parfois extrêmement complexes, car l'aspect « multimatériaux » des objets mène parfois à un mélange duquel les alliages sont difficilement extractibles (Olivetti & Cullen, 2018). Une fois que les matériaux se retrouvent broyés et séparés sur une chaîne de tri, les ferrailles métalliques peuvent être mises de côté par magnétisme, grâce à un aimant, et les alliages non magnétiques peuvent être séparés des matériaux non métalliques grâce aux courants de Foucault. Cependant, ce tri n'est pas toujours suffisant pour séparer les différentes nuances d'alliages, et leur mélange mènerait à une pollution délétère de certains éléments. Ainsi, par exemple, les aluminiums des séries 2xxx contiennent du Cu,

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

qui est ajouté afin d'augmenter leur résistance mécanique. Mais le Cu est un élément indésirable pour d'autres alliages d'aluminium, car il les rendrait moins ductiles, plus sensibles à la corrosion et ferait précipiter des phases non désirées, changeant de ce fait les propriétés mécaniques du matériau. Le tri « fin » des alliages doit donc être effectué, et des technologies fondées sur des analyses laser ou rayons X ont été mises en place pour les séparer (Gaustad et al., 2012). Cependant, ce tri reste complexe et imparfait, ce qui peut mener à des problèmes de contaminations.

Enfin, des enjeux scientifiques ont été identifiés, et seront abordés plus en détail dans la suite. Le premier est de développer de nouvelles méthodes de recyclage, afin de diminuer la consommation en énergie. Le second est la conception d'alliages orientée pour le recyclage.

Alerte / Enjeu N°1 : développer de nouvelles méthodes de recyclage, moins consommatrice en énergie.

La production de produits finis métalliques induit une production importante de chutes, qui sont sous forme de copeaux ou de poudres. Ainsi, les pertes sont de l'ordre de 40 % et plus de 80 % respectivement pour l'aluminium (Milford et al., 2011) et le titane [Discussion Y. Millet, responsable R&D, TIMET (Titanium Metals Corporation)]. Actuellement, une grande partie de ces chutes est recyclée par re-fusion (Figure 1, en bleu). Ce recyclage est déjà positif mais il faut malgré tout souligner que l'étape de re-fusion est très consommatrice en énergie. Il est donc primordial de développer de nouvelles méthodes de recyclage, tel que le recyclage par voie solide. Cette méthode consiste à compacter directement les copeaux sous forme solide par des procédés tels que l'extrusion ou le frittage (Figure 1, en vert). Au niveau académique, des propriétés mécaniques équivalentes à celles des alliages obtenus par la voie de recyclage classique ont été reportées plusieurs fois (Haase & Tekkaya, 2015; Tekkaya et al., 2009)

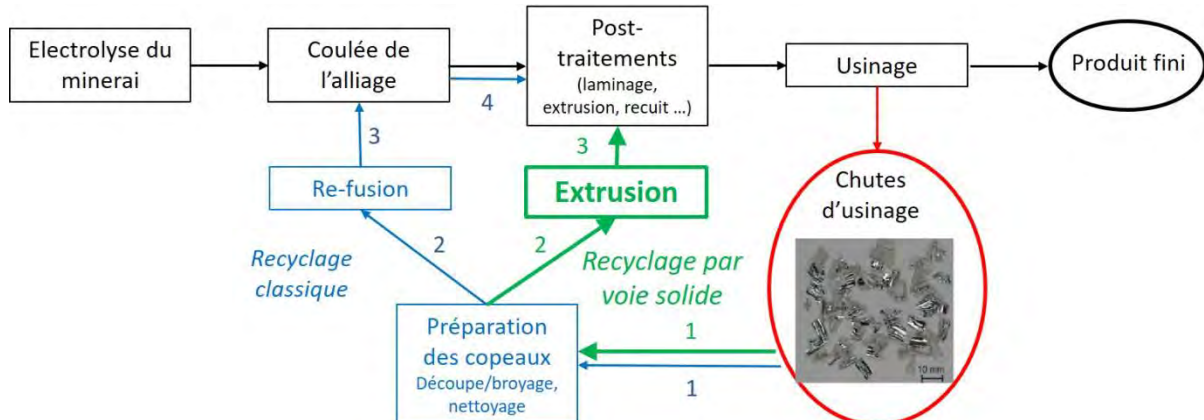


Figure 1 : Schéma présentant les étapes d'élaboration d'un alliage d'aluminium (noir), la méthode classique de recyclage (bleu) et la nouvelle méthode, soit le recyclage par voie solide (vert) pour les chutes d'usinage.

Le titane et l'aluminium semblent de bons candidats pour lancer cette nouvelle méthode car ils ont une forte valeur ajoutée et il est donc plus probable qu'un intérêt économique s'ajoutera à l'intérêt environnemental. À terme, cette méthode pourra être développée pour tous les types de métaux et alliages.

Les principaux intérêts du recyclage par voie solide par rapport au recyclage classique sont les suivants :

- Diminution de la consommation d'énergie et donc de l'impact environnemental du procédé grâce à une diminution du nombre d'étapes et surtout la suppression de l'étape de re-fusion (Duflou et al., 2015),

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

- Augmentation de la quantité d'alliages recyclables. En effet, les copeaux très fins et les poudres pourront être recyclés et la perte de matière oxydée sera limitée (elle représente 20 % pour les alliages d'Al avec le recyclage classique (Gronostajski & Matuszak, 1999)).
- Activités localisables sur le site de fabrication des produits finis et donc en France et en Europe. En effet, les équipements nécessaires pour le recyclage par voie solide sont moins lourds que ceux pour le recyclage classique. Il y a donc un intérêt économique (création de nouveaux emplois locaux) et écologique (diminution du transport de matière).
- Aide à la prise de conscience au niveau industriel du potentiel de valorisation des déchets métalliques. En effet, une volonté de développer un nouveau procédé de recyclage des matériaux métalliques montre le dynamisme et donc l'intérêt de cette filière et du recyclage en général.

Recommandations/ Propositions

Il a déjà été démontré au niveau académique que le recyclage par voie solide des chutes métalliques était réalisable et prometteur. Avant l'industrialisation, d'autres projets de recherche, en partenariat entre équipes de recherche académiques et industrielles, sont nécessaires. Tout d'abord, il faut valider le fait que les produits obtenus par recyclage par voie solide présentent les propriétés d'usage souhaitées. Certaines, telles que la ténacité ou la résistance à la corrosion, n'ont pas encore été testées. Il faut également décrire précisément l'effet des contaminations de surface qui sont inévitables sur les chutes (avec en particulier l'oxydation). On pourra ainsi déduire des valeurs seuils acceptables et des spécifications selon les applications. Il faut également évaluer l'intérêt économique en comparant les investissements nécessaires en équipements par rapport au gain en consommation d'énergie et en coûts de transport. Cet aspect montrera si des incitations institutionnelles pourraient être un levier d'action pertinent. Globalement, ces projets permettront de générer une confiance des industriels face à ce nouveau procédé.

Alerte / Enjeu N°2: Orienter la conception d'alliage pour faciliter le recyclage

La conception d'alliage joue un rôle crucial dans les processus d'économies d'énergie et de diminution des gaz à effets de serre. En effet, proposer des matériaux plus résistants permet de réduire les quantités d'alliages nécessaires, d'élargir les gammes d'utilisation (température, milieu corrosif...), d'alléger les structures ce qui a systématiquement pour conséquence de diminuer les quantités d'énergies nécessaires (conséquences directes ou indirectes) et les émissions de CO₂. De plus, en retardant la rupture des matériaux, on allonge leur durée de vie en service, et on diminue la consommation de matériaux due à un renouvellement trop rapide.

L'amélioration des propriétés des alliages, par des ajustements de compositions et de microstructure, est donc une thématique primordiale. Cependant, considérant que cet aspect est déjà l'objectif premier des recherches en métallurgie, il ne sera pas abordé ici, afin de se concentrer sur l'aspect du recyclage.

Le recyclage des alliages soulève plusieurs questions, et deux propositions sont détaillées dans la suite. Tout d'abord, la multiplicité des cycles de recyclage peut mener à un enrichissement en impuretés. Ces dernières sont aujourd'hui principalement diluées par ajout de métal primaire (issu du minerai), mais ceci implique d'utiliser de nouveau des métaux purs, et donc de s'appuyer sur des étapes d'extraction des minerais, très énergivores. Des recherches doivent donc être soutenues pour mieux comprendre le rôle de ces impuretés, comment les appréhender voire les mettre à contribution, et proposer des palliatifs.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Il est ensuite nécessaire de s'interroger sur la tendance d'ajouter un nombre croissant d'éléments d'alliages. Un exemple représentatif est celui des superalliages base nickel, auquel plus de 10 éléments peuvent être ajoutés. Ceci se justifie par l'amélioration des propriétés de l'alliage : les pièces restent en service plus longtemps, et grâce à un fonctionnement possible à plus haute température, des économies d'énergie sont faites. Cependant, il est souvent difficile de récupérer les éléments d'alliages d'un matériau, ce qui peut interroger sur les bénéfices finaux d'une telle opération, dans l'hypothèse où elle mène à la perte de métaux critiques. Une démarche visant à simplifier les compositions, jusqu'à établir des compositions « universelles » peut donc être proposée.

Proposition 1 : Appuyer les recherches sur l'impact des impuretés et sur de possibles moyens de les contrer

Les alliages tirent leurs propriétés de leur composition et de leur microstructure, l'une et l'autre étant liées. Une modification de la composition, même faible, peut avoir des effets désastreux sur le matériau final. Or, les cycles de recyclage sont propices à l'augmentation d'éléments d'alliages parfois indésirables.

Une étude pilote intitulée « le cycle du fer » s'est penchée sur les effets du cuivre comme impureté dans le fer (Birat, J.-P. & Zaoui, A., 2002). D'après certaines études, la contamination des aciers par le cuivre pourrait représenter, en 2050, près de la moitié des ferrailles (plaques) du domaine de l'automobile, qui ne pourraient donc plus être recyclées pour les mêmes applications et perdraient de la valeur (« down-cycling ») (Hatayama et al., 2014). Il est donc primordial de mieux appréhender cette pollution. L'étude pilote a permis d'établir une base de connaissances fondamentales sur les conséquences de teneurs en cuivre croissantes, et, finalement de redéfinir les valeurs critiques utilisées jusque-là comme seuil de tolérance pour les aciers. Surtout, elle propose une approche qui peut être répliquée pour l'étude d'autres impuretés dans les alliages.

Des études similaires peuvent être envisagées pour d'autres systèmes, tels que le fer comme impureté dans les alliages d'aluminium, ou l'oxygène dans les alliages de titane (Belov et al., 2002; Veronesi et al., 2013). Les filières de recyclage pour les grandes familles d'alliages commerciaux (aciers et alliages d'aluminium) étant relativement établies, bien que toujours perfectibles, il serait également intéressant de se pencher sur l'étude de systèmes plus spécialisés, comme les alliages de titane ou de nickel, pour lesquels le recyclage est moins habituel, afin de proposer des pistes de solutions. Caractériser de manière systématique l'impact des impuretés sur les réponses des alliages sous sollicitation est donc nécessaire pour accéder à une compréhension fine de leur rôle, et ceci passe par des approches fondamentales considérant des concentrations croissantes, éventuellement dans des alliages modèles. Ceci permettra non seulement de proposer un affinement des seuils critiques d'utilisation, mais pourrait aussi suggérer des approches plus novatrices de traitement des impuretés [Voir, par exemple, des solutions fondamentales visant à accommoder de grandes teneurs en fer dans des alliages d'aluminium : (Basak & Hari Babu, 2016)].

En effet, comme suggéré par le rapport conclusif de l'étude sur le cycle du fer, considérer les impuretés non comme des éléments problématiques à enlever de la matrice ou faisant perdre de la valeur au matériau mais comme des éléments d'addition désirables, permet d'apporter un regard nouveau sur cette problématique. Sous réserve d'une compréhension poussée permettant de maîtriser l'impact de ces éléments habituellement considérés comme indésirables, des stratégies visant à exploiter les capacités de l'alliage plus chargé en impuretés peuvent être mises en place. Ceci permettrait non seulement de garder ces matériaux en utilisation et de valoriser des stocks de matières premières « trop polluées », mais également de conserver la valeur des éléments d'alliage, qui ne seraient plus « perdus ».

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Enfin, l'étude et la meilleure compréhension de possibles éléments « neutralisateurs » ou « équilibrants », à l'instar de Mn ou de Ni qui, ajoutés aux alliages d'aluminium, permettent de neutraliser les effets négatifs du fer (formation de précipités aciculaires α) (Basak et al., 2019; Shabestari, 2004) doit être poursuivie pour bénéficier d'une gamme de leviers sur lesquels jouer lors de la production d'un alliage à partir de matières premières secondaires qui n'aurait pas la composition exacte recherchée. On aura ainsi une alternative à la dilution.

Proposition 2 : Définir des paramètres pour guider la conception d'alliages

Lors de leur mise en solution, les éléments d'alliages deviennent, pour un grand nombre d'entre eux, difficilement récupérables, comme illustré dans le tableau ci-dessous (Cann et al., 2020; Gaustad et al., 2012). Les cases vertes correspondent aux éléments qui peuvent être récupérés en une étape, les jaunes aux éléments qui ne peuvent pas être récupérés mais ne détériorent pas les propriétés du matériau. Finalement, les cases rouges sont celles qui sont le plus problématiques, car les éléments ne sont pas récupérés, et peuvent également être délétères pour les propriétés de l'alliage. Considérant le coût de production de ces éléments, il apparaît nécessaire d'éviter que ces derniers puissent être « perdus », et qu'ils impactent de manière négative l'alliage recyclé.

	Extractive metallurgical processes			
	Iron/Steel	Aluminum	Copper	Zinc/Lead
Ag, Au, Pt	Red	Red	Green	Green
Al	Yellow	Grey	Yellow	Yellow
Bi, Cd	Red	Yellow	Green	Green
Co, Ga, Mo, Ni, Ta	Yellow	Yellow	Green	Green
Cr	Yellow	Red	Yellow	Yellow
Cu	Red	Yellow	Grey	Green
Mg, Mn, Y, Nb, Ti, V, W	Green	Yellow	Green	Green
Pd	Red	Red	Green	Yellow
Sc, Rare earth, Hf, Zr	Red	Red	Red	Green
Zn	Yellow	Yellow	Green	Grey

Figure 2 : possibilité d'extraire un métal d'un alliage. Vert : extraction possible. Jaune : extraction complexe mais l'élément n'est pas nuisible à l'alliage. Rouge : extraction impossible et l'élément est nuisible à l'alliage. (Cann et al., 2020)

Ainsi, des lignes directrices de conception d'alliage pourraient être établies sur la base de la séparation des éléments (Nakajima et al., 2010), lorsque le matériau, après plusieurs cycles de recyclage, est en fin de vie et n'est plus utilisé. Ainsi, les différents éléments le constituant peuvent être récupérés, et utilisés de nouveau dans d'autres alliages. En complément de cette approche, la limitation du nombre d'éléments d'alliages différents utilisés dans un même matériau est une piste de réflexion, car ceci permettrait de réduire le nombre d'étapes finales d'extraction des éléments.

Une autre approche de conception d'alliage visant à simplifier les gammes de compositions a également été récemment proposée, sous le concept d'alliages « universels » (Miller et al., 2000). Ceci permettrait de simplifier leur recyclage, puisque de plus gros volumes de matériaux sont disponibles. Ainsi, l'obtention de combinaisons de propriétés désirables au sein d'un même alliage permet d'étendre son champ d'applications, en remplaçant des matériaux actuels. Par exemple, certains alliages d'aluminium des séries 6xxx ont maintenant une résistance mécanique comparable aux 7xxx : leur utilisation en remplacement des 7xxx dans les voitures permettrait de travailler avec moins de compositions, et donc d'optimiser leur tri lors du démontage des voitures. Ces stratégies encore nouvelles qui dégageraient quelques grandes familles d'alliages « universelles » qui

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

domineraient le marché, et pourraient être recyclées en circuit fermé, se heurtent cependant à des attentes en termes de performances pour certaines pièces. Malgré tout, guider le développement d'alliages qui répondraient, dans un produit manufacturé, à plusieurs fonctions, permettra définitivement de simplifier son recyclage.

Les trois axes présentés ici, de choix des éléments d'alliages en fonction de leur capacité à être finalement extraits de l'alliage, de réduction du nombre d'éléments d'alliages, et de réduction et uniformisation des nuances utilisées – principalement au sein d'un même produit – sont quelques approches qui peuvent être prises en compte pour la conception de futurs alliages. Bien qu'elles puissent sembler ne pas aller dans la même direction que la proposition 1 de ce second enjeu, l'ensemble de ces réflexions reste à poursuivre, puisqu'elles peuvent toutes se révéler plus ou moins adaptées dans des cas particuliers, selon les spécificités des matériaux.

Références :

- 2030 climate & energy framework (European Commission). (n.d.).
https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2012). *Sustainable materials: with both eyes open*. UIT Cambridge.
- Basak, C. B., & Hari Babu, N. (2016). Morphological changes and segregation of β -Al₉Fe₂Si₂ phase: A perspective from better recyclability of cast Al-Si alloys. *Materials & Design*, 108, 277–288.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.096>
- Basak, C. B., Meduri, A., & Hari Babu, N. (2019). Influence of Ni in high Fe containing recyclable Al-Si cast alloys. *Materials & Design*, 182, 108017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108017>
- Belov, N., Aksenov, A., & Eskin, D. (2002). *Iron in Aluminium Alloys* (L. C. Press (Ed.)).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482265019>
- Birat, J.-P., & Zaoui, A. (2002). The "Cycle of Iron." *Rev. Met. Paris*, 99(10), 795–807.
<https://doi.org/10.1051/metal:2002141>
- Cann, J. L., De Luca, A., Dunand, D. C., Dye, D., Miracle, D. B., Oh, H. S., Olivetti, E. A., Pollock, T. M., Poole, W. J., Yang, R., & Tasan, C. C. (2020). Sustainability through alloy design: Challenges and opportunities. *Progress in Materials Science*, 100722.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100722>
- Choate, W. T., & Green, J. A. S. (2004). *Modeling the impact of secondary recovery (recycling) on U.S. aluminum supply and nominal energy requirements* (Minerals Metals & Materials Society (Ed.); pp. 913–918). Light Metals.
- Dufloy, J. R., Tekkaya, A. E., Haase, M., Welo, T., Vanmeensel, K., Kellens, K., Dewulf, W., & Paraskevas, D. (2015). Environmental assessment of solid state recycling routes for aluminium alloys: Can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling? *CIRP Annals*, 64(1), 37–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.051>
- Gaustad, G., Olivetti, E., & Kirchain, R. (2012). Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 79–87.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>
- Gronostajski, J., & Matuszak, A. (1999). The recycling of metals by plastic deformation: an example of recycling of aluminium and its alloys chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93, 35–41.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00166-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00166-1)
- Haase, M., & Tekkaya, A. E. (2015). Cold extrusion of hot extruded aluminum chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 356–367. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.028>
- Hatayama, H., Daigo, I., & Tahara, K. (2014). Tracking effective measures for closed-loop recycling of automobile steel in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 65–71.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.006>

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

- Milford, R. L., Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2011). Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO2 abatement in the steel and aluminium sectors. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12), 1185–1195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.021>
- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37–49. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X)
- Nakajima, K., Takeda, O., Miki, T., Matsubae, K., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2010). Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling. *Environmental Science & Technology*, 44(14), 5594–5600. <https://doi.org/10.1021/es9038769>
- Olivetti, E. A., & Cullen, J. M. (2018). Toward a sustainable materials system. *Science*, 360(6396), 1396–1398. <https://doi.org/10.1126/science.aat6821>
- Raabe, D., Tasan, C. C., & Olivetti, E. A. (2019). Strategies for improving the sustainability of structural metals. *Nature*, 575(7781), 64–74. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1702-5>
- Shabestari, S. G. (2004). The effect of iron and manganese on the formation of intermetallic compounds in aluminum–silicon alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 383(2), 289–298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.06.022>
- Tekkaya, A. E., Schikorra, M., Becker, D., Biermann, D., Hammer, N., & Pantke, K. (2009). Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), 3343–3350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.047>
- Veronesi, P., Gaiani, S., Colombini, E., Poli, G., & Tisu, R. (2013). Recycling of alpha-titanium technological scrap for exhaust system parts manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 53, 332–340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.043>
- Zhang, Y., Sun, M., Hong, J., Han, X., He, J., Shi, W., & Li, X. (2016). Environmental footprint of aluminum production in China. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1242–1251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.137>