

Chapitre 2 : On ne pourra jamais se passer de matériaux.

Table des matières

2-1 Introduction	2
2-2 Covid-19, Société, Risques sanitaires et Matériaux	4
2-3 Les partenariats de développement de nouveaux matériaux entre concepteurs de produits innovants et producteurs de matériaux de haute qualité sont un facteur-clé de la capacité d'innovation en France	7
2-4 Prospectives Matériaux Polymères et Composites.....	9
2-5 Matériaux céramiques réfractaires, indispensables pour l'industrie « primaire » (élaboration des matériaux de structure) pilier de l'industrie	12
2-6 Fabrication additive métallique	17
2-7 Les enjeux de la formation post-pandémie	20
2-8 Sur la réindustrialisation et les matériaux pour l'indépendance économique de la France	29
2-9 Enjeux et défis pour les matériaux.....	31
2-10 Des aides à la R&D matériaux incomplètes.....	33

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

2-1 Introduction

Bruno CHENAL (Constellium)

Mots Clefs : Société, industrie, autonomie, approvisionnement, formation, recherche, partenariats, innovation

L'industrie des matériaux et de la métallurgie est un secteur stratégique pour la France. Il est essentiel à l'ensemble de l'industrie, en tant que producteur de bon nombre de ressources intermédiaires utilisées par les autres industries. La consommation des matériaux étant directement liée à celle des biens de consommation, la pandémie a conduit à une demande accrue dans le domaine de la santé mais également à un ralentissement dans les transports en raison des restrictions de mobilité. Ces restrictions ont exacerbé **la nécessité de maintenir une industrie manufacturière en France alimentée par des approvisionnements locaux et sécurisés.** Il convient donc de bâtir **une véritable économie circulaire pour les matériaux** avec notamment le recyclage des matériaux ou l'émergence des bio-matériaux. La pandémie semble avoir accentué la prise de conscience environnementale et accéléré cette évolution inéluctable vers une économie durable.

L'industrie des matériaux et de la métallurgie représente **plus de la moitié des emplois industriels français.** Au côté des grandes entreprises telles que ArcelorMittal, Constellium, Eramet, Aperam, il y a également de nombreuses petites et moyennes entreprises. Pour le secteur de la métallurgie, c'est plus de 43 000 entreprises dont 80% de moins de 50 salariés.

A travers les âges et au fil des évolutions technologiques, cette industrie a toujours su **évoluer, se transformer, innover et s'adapter.** On est aujourd'hui bien loin de l'image du forgeron. L'ensemble de sa chaîne de valeur se modifie, de l'extraction du minerai ou de la synthèse des matières premières à leur recyclage en fin de vie, de la fonderie à la fabrication de produits. Des nouvelles contraintes apparaissent mais aussi de nouvelles opportunités. La transformation digitale profonde et rapide est un des éléments de cette transformation. La filière participe aujourd'hui pleinement à la révolution technologique de «**l'industrie 4.0**».

La montée en puissance du numérique, la production des énergies vertes, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, les besoins en nouveaux matériaux pour la santé impactent **les produits existants et les nouveaux produits,** avec la miniaturisation et l'intégrations des composants et l'évolution des matériaux (développement de matériaux composites, nouveaux matériaux métalliques résistants à haute température, nouveaux matériaux céramiques, traitements de surface fonctionnels, poudres pour la fabrication additive métallique, intégration de matériaux plus léger – aluminium...).

Les **besoins en recherche et innovation sont tirés par les principaux secteurs applicatifs :** aéronautique, automobile, énergie avec comme chef de file les leaders industriels français tels que Airbus, Safran, Renault, PSA ou EDF et leurs grands **centres de R&D industriels** en France. Les conséquences économiques de cette pandémie **risquent de réduire durablement leurs investissements en R&D** en interne mais également par voie de conséquence ceux de leur fournisseurs de matériaux. Cela risque également de mettre en péril de nombreux projets collaboratifs avec les centres de recherche académiques ou les instituts technologiques (IRT). C'est tout cet ensemble qui se trouve fragilisé. Des propositions sont faites pour **soutenir sur la durée cet effort de R&D indispensable ainsi que la collaboration de l'ensemble des acteurs de l'écosystème des matériaux en France** à tous les niveaux de TRL : du concept/modèle au démonstrateur industriel.

La transformation de l'industrie des matériaux impacte également les processus de fabrication : complexification des outillages, apport d'intelligence (via des capteurs) pour réaliser des diagnostics

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

ou de la maintenance prédictive ; de la simulation numérique ; l'interconnexion des processus ; utilisation des robots /cobots. De nouveaux modes de fabrication apparaissent comme **la fabrication additive**. Le développement de nouveaux matériaux, la combinaison et l'assemblage de multi-matériaux et l'association de plusieurs technologies (mécanique, métallurgie, physicochimie, intelligence artificielle, cobotique¹, IoT²...) **modifient profondément les métiers**.

Les métiers évoluent. Ils sont devenus de plus en plus techniques et spécialisés à tous les niveaux de l'opérateur à l'ingénieur de fabrication ou de recherche et développement. Le secteur actuellement déjà en **pénurie de main d'œuvre spécialisée** va connaître de nouvelles vagues de départ en retraite, conséquence économique de cette pandémie. Ces **pertes et manques de compétence** vont impacter non seulement les employés de l'industrie mais également toutes les filières de formation académique ou professionnelle. Les besoins sont importants, mais le secteur n'est pas toujours aussi attractif qu'il le souhaiterait, souffrant d'une image dégradée en raison de son empreinte industrielle « traditionnelle ».

Les recrutements favorisent désormais la poly-compétence et la poly-qualification, la flexibilité dans les modes d'apprentissage. Les formations doivent être de plus en plus interdisciplinaires, multiphysiques, numériques et intégrer le développement durable.

Ce chapitre montre à quel point cette pandémie vient souligner avec une acuité accrue l'importance et la criticité de l'industrie des matériaux pour notre économie. Il met notamment l'accent sur les besoins d'innovation de recherche et développement en mode collaboratif sur l'ensemble de la chaîne de valeur et en étroite symbiose entre la recherche privée et académique. Tout ceci suppose que les formations matériaux s'adaptent et préparent les acteurs de demain pour un monde durable.

¹ cobotique : ensemble des techniques concernant les robots collaboratifs

² IoT : Internet of Things (Internet des Objets)

2-2 Covid-19, Société, Risques sanitaires et Matériaux

Extrait du “Chapter 11 – Materials, COVID-19 and sanitary risks” du livre de Jean-Pierre .BIRAT « Sustainable materials science – environmental metallurgy », Volume 2 –Pollution and emissions, biodiversity and ecotoxicology, economics and social roles, foresight ; EDP Sciences, publié le 22 février 2021, [lien vers le site de l’éditeur](#)

Mots Clefs : pandémie, risque, société, environnement

Introduction / Constat : impact sociétal et économique de la pandémie

Les conséquences de la crise sanitaire touchent toutes les activités économiques et sociales. **Aucune analyse de risque n’avait prévu un tel scénario.** Cette situation a généré un nombre gigantesque d’informations sur la pandémie et ses conséquences publiées en temps réel, en open access ...trier les bons papiers des plus douteux est bien difficile. Le chapitre 11 du Livre dont ce document est extrait a passé en revue de nombreux articles. Étant donné le peu de connaissance que l’on a sur le virus, ses conséquences et les scénarios possibles, il ne s’agit pas d’une bibliographie scientifique traditionnelle. **Les Virus** et en particulier le coronavirus SARS-CoV-2 font partie de la biodiversité. Ils sont. La plupart sont inoffensifs, mais quelques-uns sont dangereux pour l’homme. Le COVID 19 ou SARS-CoV-2 s’est répandu autour du monde très rapidement en infectant des millions de personnes. **C’est une des plus rapides pandémies de l’histoire.** Le nombre d’épidémies et de pandémies a nettement augmenté récemment en parallèle avec **l’augmentation de la population et les changements environnementaux.** Il y a bien corrélation mais pas nécessairement causalité avec la diminution de la biodiversité, l’urbanisation et le changement climatique. Les **confinements** utilisés pour la première fois comme outil de maîtrise de la pandémie par de nombreux gouvernements ont transformés la crise sanitaire en **crise économique et sociale** (chômage, pauvreté, exclusion numérique...) en stoppant ou modifiant beaucoup d’activités. La **modélisation épidémiologique est très difficile**, les paramètres étant contrôlés à la fois par des décisions politiques et le comportement des individus. Sans compter que les caractéristiques de la maladie elle-même et de sa contagion sont mal connues (incluant des mutations virales). Tout ceci ne facilite pas la définition de scénarios de fin de pandémie, d’une « disparition » naturelle à une situation sans remède ni immunité durable Dans un monde idéal, l’économie retournera à un « business as usual ». Mais en fait la situation a conduit à **des changements importants dans les manières de vivre et de travailler** (télétravail, commerces à distance, transports ...). Pour certains secteurs, la crise met en évidence des risques structurels qu’il faudra résoudre pour une vraie relance. Dans l’attente, les gouvernements injectent des grandes quantités d’argent pour pallier aux situations critiques de divers secteurs économiques. Cependant, il semble clair que pour redémarrer l’économie, il faudra prendre en compte les conditions qui ont conduit à cette pandémie et à ses conséquences, par exemple pour les chaînes d’approvisionnement Dans la crise sociale, il ne faut pas oublier **la situation de l’enseignement**, de l’école à l’université voire les écoles doctorales. De nouvelles approches pédagogiques ont été développées (parfois avec difficulté, du fait d’un accès limité au numérique et au manque d’accès à des professionnels de l’enseignement – les parents n’ont pas toujours pu jouer efficacement ce rôle), mais l’échange direct via le lien social est important pour consolider les connaissances et les transformer en expérience. L’apprentissage a été perturbé et la validation des savoirs n’est pas garantie. Une autre dimension est impactée : **la géopolitique**, la façon de gérer la crise, les interactions et échanges avec les autres pays, la mobilité... Un nouveau paysage économique peut en surgir. Comme les chinois l’expliquent, crise égal risques plus opportunités, à saisir. Cette crise a mis aussi en avant **une ambiguïté envers la science** et les gouvernements de la part de l’opinion publique, **beaucoup d’espoir et beaucoup de méfiance.** La méconnaissance de la maladie a conduit à des prises de décisions difficiles et incompréhensibles.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Alerte / Enjeu N°1 : les matériaux, des évolutions quantitatives et qualitatives

Si on regarde les matières premières comme **l'énergie ou les matériaux**, leur évolution reflète celle de l'industrie et des biens de consommation. Les productions d'acier, d'aluminium, de béton ont bien sûr chuté en 2020 et la suite dépend du redémarrage soutenu par des plans de relance. Ainsi la construction devrait redémarrer rapidement tandis que les industries automobile et aéronautique (chute forte du trafic aérien) resteront plus longtemps en récession. Ceci aura bien sûr des conséquences sur le béton, l'acier, l'aluminium. La suite dépendra principalement de l'écart entre la nouvelle normalité post-pandémie et le Business d'avant. Les changements en cours et à venir vont impacter **qualitativement** (e-mobilité, batteries, hydrogène, énergies renouvelables) et **quantitativement** (moins de mobilité, technologies de l'information) les volumes et les matériaux (nature : ex. cuivreux, silicium, cobalt, lithium, terres rares, composites). Ci – dessous un **exemple de matériaux pour la mobilité électrique et l'énergie** :

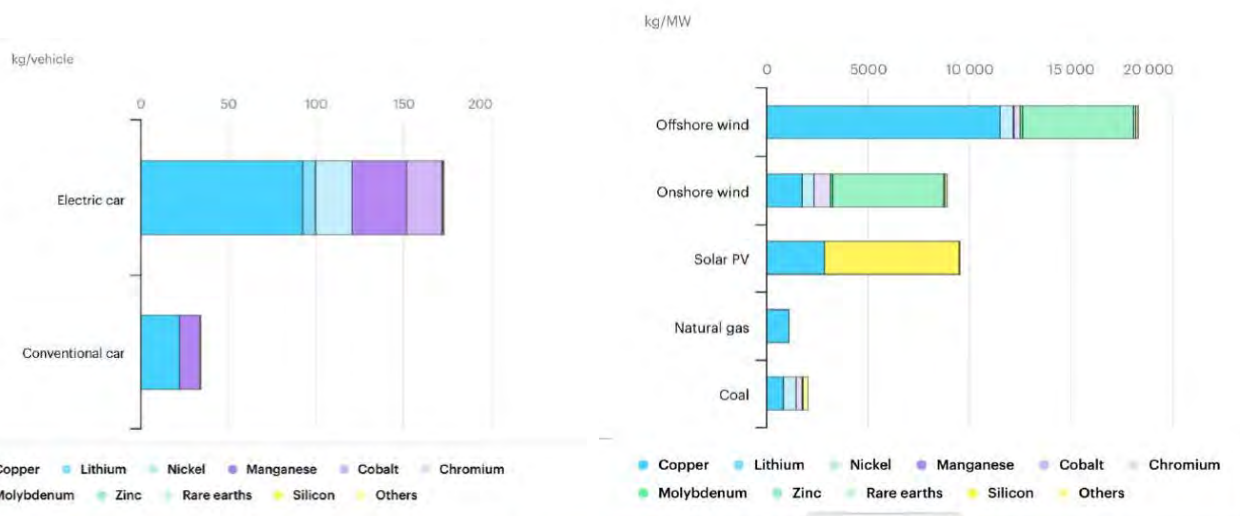


Figure 11.25 – Minerals used in selected mobility technologies (courtesy of IEA [132]) Figure 11.24 – Minerals used in selected power generation technologies (courtesy of IEA [132])

Les matériaux pour la **santé** voient leur développement s'accroître à la fois pour la vie courante (masques) mais aussi vers un plus haut niveau de sophistication. Les matériaux resteront donc clés pour les diverses industries et développements mais dans une vision écologique et sociale différente. **L'économie circulaire** est la piste à privilégier pour un futur résilient. Cependant les masques sont eux jetés pour incinération... Le **télétravail** devient une pratique qui va devenir durable pour les entreprises. Il va conduire à une diminution de la construction d'espaces de bureaux dans les villes (mais des espaces de co-working vont fleurir près de nœuds de transport). Au-delà du télétravail, la crise sanitaire a accru la **dépendance aux outils de communication**, accès à internet, systèmes d'information, et autres services digitaux. Le pas vers une économie plus digitale est franchi et l'industrie 4.0 voire 5.0 est là. Les infrastructures support devront être renforcées dans le futur (antennes, stockages, serveurs...), donc de l'acier, du béton, des cuivreux, du silicium, du lithium...

Enjeu / Alerte N°2 : Matériaux et Santé

Les risques d'être contaminé en touchant des matériaux qui le seraient ont fait l'objet de nombreux articles dans la presse (survie du virus de quelques heures à quelques jours en fonction des matériaux ... et des articles). **Certains matériaux tuent les bactéries ou les virus**. Le cuivre et le laiton sont biocides et cette propriété a été souvent mentionnée pour son utilisation pour les pièces de monnaie. Il en est de même pour l'argent. D'autres matériaux comme les films PET ont aussi cette propriété. Des revêtements adaptés par exemple sur acier inoxydable peuvent aussi jouer un tel

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

rôle : ils sont de même nature que les peintures antifouling des coques de bateau. En plus des équipements de santé (hôpitaux, respirateurs, masques ...), de nombreux matériaux dits « Biomatériaux » sont utilisés comme implants chirurgicaux (métaux, céramiques, polymères, composites, matériaux naturels) et la recherche dans le cadre des nanotechnologies est très active.

Enjeu / alerte N°3 : Environnement

Le rôle de la **diminution de la biodiversité** a été identifié comme un paramètre possible de l'émergence du COVID19. La réduction des zones sauvages facilite la circulation des espèces entre les forêts tropicales et les zones habitées, les villes. Les mutations des virus permettent le passage d'une espèce à l'autre, certaines faisant partie de la nourriture humaine ... Ceci pourrait conduire à **repenser les villes** et leurs interactions avec la vie sauvage, au-delà des parcs et jardins en créant des zones « libres » pour la faune avec des passages (corridors) vers les espaces naturels. Ceci pourrait conduire à la construction de nouvelles infrastructures faisant appel au bois, au béton, pierre, acier... voire à des matériaux intelligents pour la connectivité. Notre connexion à la nature doit être réévaluée pour aller du curatif vers le préventif. Une autre évolution des villes démarre : des équipements en toiture, dans des bâtiments spécifiques... **pour des cultures et assurer des approvisionnements alimentaires locaux, fruits et légumes**. Ils nécessiteront des matériaux pour des cellules photovoltaïques, des isolants en toiture, des constructions durables ... Le confinement a eu en fait des conséquences négatives mais aussi positives d'un point de vue changement climatique : en effet il a **réduit de façon significative les émissions de gaz à effet de serre. De même, le bruit, la pollution de l'air, celle de l'eau ont diminué**. Mais en parallèle, le **recyclage a diminué, les déchets augmenté** (ex. les plastiques dans les emballages individuels mono usage). L'utilisation de la bio-métallurgie pourrait être aussi remise en cause bien que les technologies soient basées sur des bactéries et non pas des virus.

Référence pour les figures : Clean energy progress after the Covid-19 crisis will need reliable supplies of critical minerals, IEA, 6 May 2020, <https://www.iea.org/articles/clean-energy-progress-after-the-covid-19-crisis-will-need-reliable-supplies-of-critical-minerals>

2-3 Les partenariats de développement de nouveaux matériaux entre concepteurs de produits innovants et producteurs de matériaux de haute qualité sont un facteur-clé de la capacité d'innovation en France

Hubert SCHAFF

Mots Clefs: Innovation, Applications nouvelles, Matériaux innovants, Partenariat Concepteur-Producteur, Localisation industrielle

Constat Post COVID sur le thème

Certains producteurs de matériaux français sont fragilisés ou à vendre

Alerte / Enjeu

L'industrialisation d'un produit innovant conçu en France devient incertaine si le producteur des matériaux nécessaires n'existe pas en France, et si les compétences pour le développer sont lointaines.

Le bureau d'études et les services de fabrication d'une entreprise innovante ont souvent besoin des équipes de R&D du producteur de matériau pour développer les produits industriels présentant les propriétés d'usage et de mise en œuvre adaptés au nouvel équipement. Ces matériaux nouveaux conditionnent également la durabilité et la recyclabilité. Dans de nombreux cas, la réussite de ces développements conditionne directement la réussite de l'innovation et sa place sur le marché.

Recommandations/ Propositions

Il est nécessaire de conserver en France une panoplie de producteurs de matériaux de haute qualité pour permettre des partenariats de développement de nouveaux matériaux présentant les propriétés nécessaires à la nouvelle application.

Conclusion

Ne pas laisser s'échapper hors de France les centres de décision, les usines et les centres R&D des producteurs de matériaux de haute technologie.

Annexe :

Pour conserver la capacité d'innover en France, et être capable de réussir l'industrialisation de ces innovations, il est indispensable de préserver la présence en France d'une panoplie complète de producteurs de matériaux de haute qualité, et les compétences associées.

Le succès d'une innovation est le plus souvent dépendant de la qualité des matériaux qui servent à la concrétiser. Dans de nombreux cas, l'innovation elle-même dépend de la capacité à développer un ou plusieurs matériaux nouveaux présentant des propriétés particulières, ou un compromis de propriétés d'usage et de mise en œuvre différents des matériaux standards existants. Si les matériaux utilisés pour réaliser les préséries sont imparfaitement adaptés ou insuffisants, l'industrialisation de l'innovation est vouée à l'échec, et les perspectives d'emplois industriels disparaissent.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Le concepteur dans son bureau d'études, associé aux services production industrielle dans son entreprise ne possèdent pas les compétences pour réussir seuls le développement de ces nouveaux matériaux. Ils ont besoin des compétences des services R&D des producteurs de matériaux. Si ce producteur n'est pas en France, le succès devient plus incertain : il y a un risque supplémentaire de fuite d'information vers un concurrent de ce pays, et de ralentissement de l'étude si ce producteur fait des développements analogues avec d'autres dans la même période. Or un délai d'aboutissement le plus court possible est un facteur-clé de succès important en innovation. L'indépendance nationale procure les meilleures chances de confidentialité et de réussite rapide.

Les exemples de succès dans les années récentes sont nombreux, notamment :

- nouveaux alliages Aluminium-Lithium pour l'aéronautique (Constellium)
- nouvelles nuances d'alliages d'aluminium pour automobiles (Constellium)
- nouvelles nuances de tôles en aciers pour l'allègement des automobiles (ArcelorMittal)
- nouvel acier ultra-haute-résistance pour les arbres de turbine du moteur LEAP Safran (Aubert & Duval)
- etc...

Sans la présence en France des usines de ces producteurs et des compétences de leurs centres R&D, le succès de ces développements n'aurait pas été le même.

Noter en outre que les laboratoires de recherche académiques français sont associés par des contrats et des thèses dans ce type de partenariat industriel. Ils y apportent des compétences de très haut niveau et contribuent à la progression des connaissances des industriels. La France paraît aujourd'hui en bonne position dans ce domaine, et il n'est pas souhaitable de freiner cette dynamique.

En conclusion, il paraît fondamental de **ne pas laisser s'échapper hors de France** les centres de décision, les usines et les centres R&D des **producteurs de matériaux de haute technologie**, pour maximiser les capacités d'industrialisation des innovations.

2-4 Prospectives Matériaux Polymères et Composites

Contribution : Isabelle ROYAUD pour l'équipe 304-Physique, Mécanique et Plasticité, Institut Jean Lamour

Mots Clefs : polymères, composites

Avenir des matériaux polymères et composites :

Comme l'ont très bien montré Y. Grohens et J. Duchet-Rumeau dans un Rapport de Convergence sur les grands enjeux des matériaux polymères en 2019, les principaux défis des polymères et composites concernent principalement la **gestion de la complexité structurelle et des propriétés physiques associées à divers nouveaux matériaux polymères hybrides**. Ils répondront aux exigences de performance et de sécurité des polymères et composites du quotidien, tout en intégrant la vitesse et la sobriété de développement, de personnalisation, voire de simplicité d'innovation. Pour ceci, il faut :

- Faire appel à la **simulation numérique** de manière complémentaire aux approches théoriques et expérimentales en prenant en compte de manière plus fine les conditions aux limites des propriétés du matériau.
- Innover sur la **modélisation des couplages photo-hydro-chimio-thermomécaniques** sous sollicitations statique et dynamique (fatigue) pour une estimation réaliste des durées de vie dans les conditions d'usages pour la prédiction de la durabilité.
- Répondre à la question : **peut-on tirer des lois de comportement des relations microstructures/propriétés pour bâtir des modèles prédictifs?** Sachant qu'une loi de comportement est spécifique pour chaque matériau, qu'elle ne peut donc pas être universelle et qu'elle doit représenter le matériau dans toutes les situations, quelques soient les sollicitations, les conditions de dépendance du matériau (vitesse, température).
- Utiliser les **apports de l'Intelligence Artificielle** pour l'accélération des développements dans le domaine de la formulation et des mises au point de procédés. Demain, nous devrions être capables de concevoir une structure hiérarchique basée sur les données de simulation multi-échelles du cahier des charges d'un objet en matériau polymère ou composite.
- Respecter les **enjeux environnementaux** et poser les questions de la réduction des impacts des plastiques par une meilleure recyclabilité, de la durabilité des propriétés des polymères issus de la biomasse ainsi que de l'apport des polymères bio-sourcés ou biodégradables dans les objets de la vie courante. La grande diversité des polymères, leur stabilité en température, l'éventail de distribution des masses molaires et l'architecture biologique ouvrent des opportunités d'exploration de la relation structure-propriété des matériaux écologiques.
- Tirer profit des **outils de la plasturgie tels que l'extrusion réactive et/ou multi-nanocouches pour structurer les matériaux polymères aux différentes échelles**. Il résulte de ce processus une stratification des polymères qui peut induire des effets d'interfaces dans des échantillons massiques. De nombreuses propriétés innovantes en découlent et des questions de physique fondamentale du confinement/interfaces sont toujours d'actualité. De plus, l'architecture des polymères peut être réalisée aussi maintenant **par impression 3D** et combinée avec des techniques d'auto-organisation des matériaux polymères. La combinaison de ces processus / nanostructures devrait apporter à l'avenir **des systèmes stimulables, des capteurs et des actionneurs innovants**. L'importance de la prise en compte des **divers couplages électrique, mécanique, thermique** et l'ouverture vers d'autres disciplines pour chercher des informations complémentaires (propriétés diélectriques par exemple) par l'étude des dynamiques

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

relaxationnelles et des propriétés couplées sont des domaines riches d'applications issues du contrôle des diverses échelles de structuration.

- Répondre au défi soulevé qui est celui de la conception-préparation des échantillons et de leur conditionnement pour la recherche. **Quelle est la représentativité d'un échantillon** modèle, d'un échantillon industriel simplifié et quels sont les liens avec l'échelle de la mise en œuvre employée ? Quelle est la pertinence du mode operando en situation d'investigation hors équilibre ou co-localisées ?
- Suivre **l'évolution des structures sous contrainte** en explorant le domaine des grandes vitesses de déformation dans les composites où les techniques d'investigation in-situ doivent faire preuve d'ingéniosité.

Quelques pistes prospectives dans le domaine des matériaux polymères et composites :

1. Mécaniques des polymères et composites.

Cette discipline devrait attirer plus de chercheurs parce qu'elle a renouvelé ses objets d'études (ex : les nanocomposites chargés ou renforcés pour donner des propriétés fonctionnelles particulières et pour l'allègement de la structure) tout en préservant les compétences disciplinaires (la mécanique des matériaux et en particulier des polymères à l'état solide) qui sont les fondements mêmes des connaissances de bases souvent nécessaires aux travaux de recherche pluridisciplinaires.

2. Approches de recherche transverses.

La synthèse du matériau par les chimistes/physicochimistes et la prise en compte du procédé est nécessaire pour obtenir la performance physique. Il est donc nécessaire de fédérer les chimistes, les rhéologues, les plasturgistes, les chercheurs du génie des procédés pour le design d'un matériau à fonction(s) spécifique(s) et les spécialistes des relations microstructures/propriétés physiques voulues.

3. Développement de nouveaux outils expérimentaux (couplages *in situ*).

Afin de développer des caractérisations originales pour la pertinence de la mesure, le développement de nouveaux outils d'analyse de couplage *in situ* est requis. Ce développement est chronophage et pas forcément reconnu. Par conséquent, nous devons passer du temps à les développer dans un monde de recherche où la valorisation à court terme est le seul facteur pris en compte dans l'évaluation. Il faut permettre de recruter des perso

4. Reconnaissance des mesures des propriétés physiques des polymères et composites.

S'intéresser aux comportements physiques des matériaux polymères et composites semble essentiellement toujours motivé par des vocations applicatives. Les travaux scientifiques dans ce domaine doivent être jugés aussi importants que d'autres dans la hiérarchie de la valeur scientifique. Il faut s'intéresser et proposer

5. Complémentarité des compétences théorie/expérience/numérique.

Il existe des travaux orientés vers le développement d'études théoriques et de simulations numériques pour la conception de matériaux fonctionnels dans le but de mieux comprendre notamment les phénomènes de transfert multi-composants. Cette complémentarité autorise à choisir des standards pour le développement de structures complexes, de déterminer des mécanismes physiques spécifiques liés aux nanostructures, et d'établir des connexions entre différentes échelles. Des systèmes (multi)fonctionnels intégrant les polymères seraient ainsi conçus permettant d'atteindre les fonctionnalités visées.

6. Impact environnemental, durabilité, écoconception et en particulier la fin de vie des matériaux polymères et composites.

L'économie circulaire et la recyclabilité doivent être intégrée dès la conception des objets en matériaux polymères et composites en intégrant les matériaux biosourcés et issus de la biomasse pour une durabilité contrôlée et une performance optimisée de l'objet produit en usage.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

7. **Études des matériaux polymères et composites utilisés à l'interface de la discipline « santé ».**
De nouveaux matériaux composites innovants en Odontologie sont en préparation, les caractérisations des propriétés mécaniques de l'os, des muscles, des artères, des tendons, la durabilité des implants biomédicaux *in vivo* sont autant de nouveaux défis à atteindre.
8. **Prise de conscience de fédérer la communauté des polyméristes Lorrains puis du Grand-Est sur la thématique 'Relations Microstructures/Propriétés des Polymères' de la synthèse à l'objet,** création de cette Fédération par l'équipe PMP304 en novembre 2019. Afin de fédérer la communauté qui doit être reconnue par l'UL et rendre lisible à l'échelle nationale cette communauté, celle-ci doit pouvoir se reconnaître dans des appels à projet propre, dans des postes de chercheurs fléchés afin de pallier les difficultés de recrutement, dans des journaux scientifiques ciblés et reconnus porteurs des thématiques précédemment citées.

2-5 Matériaux céramiques réfractaires, indispensables pour l'industrie « primaire » (élaboration des matériaux de structure) pilier de l'industrie

Pascal PILATE, Jean-Louis GUICHARD, Jacques POIRIER, pour la Commission mixte GFC-SF2M « Matériaux céramiques réfractaires »

Mots Clefs : réfractaires, Procédés, aciers, métaux non ferreux, ciment ,verre, approvisionnement, industrie lourde, formation

Constat Post COVID sur le thème

L'épidémie de COVID 19, surtout lors du premier semestre 2020 et vraisemblablement pour une période beaucoup plus longue nous a cruellement rappelé combien nous sommes dépendants de productions extra-européennes. Cette dépendance s'est surtout révélée pour des produits de première nécessité en cette période de crise, comme par exemple les masques sanitaires, les médicaments, le plexiglas, le matériel électronique,...

Le grand public ignore que l'épidémie a également touché d'autres secteurs et notamment des **secteurs industriels importants, voire stratégiques**. C'est notamment le cas de **l'approvisionnement en matières premières minérales spécifiques, dont dépendent certaines productions fondamentales**. Si l'épidémie a amplifié certains faits, il est notoire qu'il existe également une **dépendance** dans ce domaine, qu'elle perdure depuis un certain temps et risquent d'être critique dans le futur. Cette dépendance n'est pas suffisamment prise en considération par les autorités nationales et européennes ainsi que les sociétés financières. Dès à présent, elle conduit à des dysfonctionnements de notre société qui pourraient devenir catastrophiques.

La mondialisation est, à long terme, un phénomène irréversible. Cependant, aujourd'hui, la **perte d'un minimum d'autonomie** dans certains secteurs « clés » pourrait remettre complètement en question notre modèle de civilisation occidental. Ces secteurs concernent principalement les matériaux et la chimie : **production de l'acier, des métaux non ferreux, du ciment, du verre, des céramiques, ...** Rappelons que le ciment est le premier matériau produit dans le monde et l'acier, le second.

Ces productions nécessitent à la fois la maîtrise des procédés de **fabrication à hautes et très hautes températures** (par exemple 1600°C pour l'acier) et donc également la maîtrise des outils nécessaires à ces procédés.

Cette nécessité peut se concrétiser par quelques besoins essentiels :

- Une industrie performante capable de fabriquer les produits
- Les outils de fabrication récents et donc des investissements importants
- Des matières premières
- Une connaissance, un savoir-faire et une compétence suffisante

D'autre part, **ces industries stratégiques et vitales sont des industries à forte émission de CO2**.

Face à l'urgence environnementale, elles sont confrontées à des **défis scientifiques et technologiques** considérables : créer et mettre en place de nouvelles filières « décarbonatées », ce qui nécessitera à très court terme des investissements importants et donc des ressources financières colossales

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

La présente note est destinée à **situer les matériaux réfractaires, matériaux indispensables à ces industries primaires, qualifiées d'industries du feu, dans cette chaîne de valeur et de définir certains besoins.**

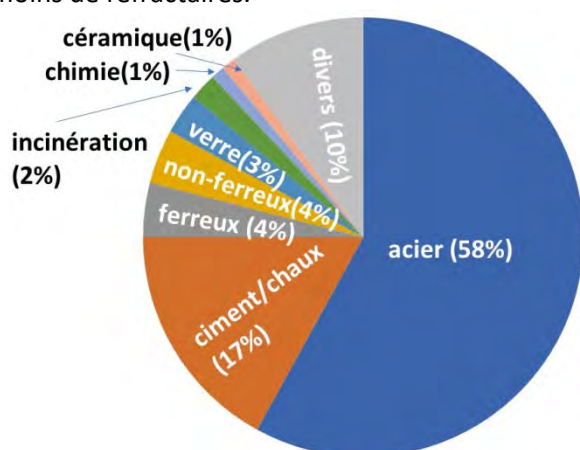
Alerte / Enjeu N°1: Les matériaux réfractaires sont clefs pour l'industrie

Les matériaux réfractaires sont des matériaux de structures (briques, béton, mortiers, ...) utilisés dans les installations industrielles qui fonctionnent à haute température : fours, récipients, chaudières, réacteurs... Ils permettent de confiner des volumes maintenus à haute température, ils servent à contenir et transporter des solides ou des liquides à haute température.

Ces matériaux doivent présenter une **bonne stabilité physique et chimique en service**. La stabilité physique signifie principalement une constance dimensionnelle dans le temps. En effet, des variations de dimensions importantes en service peuvent conduire à des contraintes thermomécaniques et des désordres structurels qui conduisent à la destruction des installations. La stabilité chimique signifie principalement deux choses : une corrosion (usure) limitée et maîtrisée afin d'assurer une durée de vie « suffisante » pour que le procédé soit rentable, et une faible interaction avec le(s) produit(s) fabriqué(s) ou traité(s), afin d'éviter une contamination et des transformations. Ceci permet notamment d'obtenir des produits très propres avec des performances élevées.

Les matériaux réfractaires sont absolument indispensables à la construction des fours à coke et des hauts fourneaux, au garnissage de tous les récipients de transport et de traitement de la fonte et de l'acier. Les réfractaires sont utilisés pour le **garnissage de tous les fours de fusion et de traitement thermique pour la fabrication du verre, du ciment, de la chaux, la production des métaux non-ferreux, la fabrication de céramiques et de produits chimiques, la galvanisation, ... Ils sont également utilisés pour des procédés de mise en forme tels que le coulage (fonderie) et le recuit, pour la production d'énergie (chaudière à énergie fossile, biomasse, ...) et la gestion des déchets domestiques et industriels (incinération).**

La principale utilisation est actuellement la **production d'acier** (consommation d'environ 70% à l'échelle mondiale, 58% en Europe), les autres secteurs sont moins importants et/ou consomment moins de réfractaires.



Répartition du marché des réfractaires en Europe.

Bien que le volume de réfractaires, ainsi que la part financière qu'ils représentent dans la fabrication des biens soient faibles (acier : 15-20 kg/t, cuivre : ~3kg/t, ciment : ~3kg/t, verre : ~ 4kg/t), il est évident qu'ils sont absolument nécessaires et **peuvent donc à ce point de vue être considérés également comme stratégiques et suivis comme tels pour l'autonomie de nos « industries du feu ».**

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Alerte / Enjeu N°2 : les Matériaux réfractaires sont très techniques et les approvisionnements hors Europe

Les matériaux réfractaires sont fabriqués à partir de **différentes matières premières naturelles et synthétiques**. D'une manière générale, on peut les classer en trois grandes familles : les produits du système binaire alumine-silice ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), les produits basiques et les produits spéciaux.

A l'extrémité du système, on trouve les matériaux réfractaires siliceux ($\text{SiO}_2 > 93 \%$). Ces produits sont fabriqués à partir de quartz naturel qui se transforme en cristobalite et tridymite lors de la cuisson. Ils sont principalement utilisés en verrerie (voûte de four) et en cokerie (parois four-carneaux). Il semble qu'aujourd'hui, la diminution du nombre de fournisseurs, ainsi que le regain d'intérêt pour la rénovation des fours de cokerie en Europe, conduise à une pénurie de « briques de silice » et à des importations en provenance de Chine. De plus, toujours dans le domaine de la cokerie, une tendance consiste à utiliser des produits à base de silice amorphe obtenue par fusion du quartz. Il y a des productions de silice fondue uniquement en Amérique et en Asie, mais pas en Europe.

Les **produits binaires $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$** comprennent les matériaux argileux (18-45 % Al_2O_3), les produits à base d'andalousite ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) (55-65% Al_2O_3), les produits de mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$, ~ 70% Al_2O_3), les produits de bauxite (hydroxyde d'aluminium) calcinée ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 80 \%$). À la deuxième extrémité du système, on trouve les produits l'alumine synthétique ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 95 \%$). Les argiles sont aisément disponibles en Europe, mais l'andalousite provient principalement d'Afrique du Sud (60 %), du Pérou (~10 %), et de Chine (~10 %). Une production limitée (20 %) existe cependant en France (à Glomel située en Bretagne). La bauxite «réfractaire» (> 80% Al_2O_3 (calcinée)) provient principalement de Chine, du Brésil et de Guyane (>90%). L'alumine synthétique est fabriquée par voie chimique à partir de bauxite de moindre qualité ($\text{Al}_2\text{O}_3 < 80\%$) beaucoup plus disponible sur le marché mondial. Cette alumine peut également servir à la fabrication de la mullite. Des productions existent en Europe.

Pour cette famille de matériaux (alumine-silice), toutes les productions devraient être repensées principalement en fonction des possibilités locales : présence d'argile, quantité limitée d'andalousite, alumine d'origine synthétique.

Les **matériaux basiques** correspondent principalement aux matériaux fabriqués à partir de magnésie (MgO), de dolomie (MgO,CaO), de chromite ($(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al,Fe})_2\text{O}_4$), d'oxyde de chrome (Cr_2O_3),... qui sont soit d'origine naturelle, soit d'origine synthétique (élaborées à partir d'eau de mer ou de saumure). Ils servent à la fabrication de matériaux : magnésie, magnésie carbone, magnésie spinelle (MgOAl_2O_3), alumine spinelle, dolomie, magnésie-chrome, alumine-chrome,...qui sont principalement utilisés en sidérurgie et en cimenterie. La magnésie représente environ 25 % des matières premières nécessaires aux matériaux réfractaires. Elle est produite un peu partout dans le monde, mais les deux plus grosses productions se situent en Chine et en Russie (>65 %), le reste est dispersé dans de petites productions dans le monde (Turquie (10%), Inde, Australie, Grèce, Amérique,...). Elle est indispensable à l'obtention d'acier. La dolomie est disponible en Europe, cependant, ses produits présentent notamment une grande sensibilité à l'humidité, ce qui les rend beaucoup moins pratiques et performants que la magnésie. Leur recyclage est difficile et même impossible alors que celui de la magnésie est largement pratiqué. La chromite et l'oxyde de chrome (issus de la chromite) permettent de fabriquer des matériaux très résistants à la corrosion (alumine-chrome par exemple). L'oxyde de chrome présent dans ces produits peut, pendant leur utilisation à haute température, s'oxyder en Cr VI cancérigène et depuis quelques dizaines d'années, on évite d'utiliser les produits qui en contiennent. Cependant, dans quelques applications spécifiques, ils restent encore indispensables, comme par exemple dans les installations sidérurgiques sous vide RH/RH-OB. Dans les fours d'incinération de déchets industriels, des solutions de remplacement sans oxyde de chrome sont actuellement testées. Le sable de chromite «réfractaire» est également

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

utilisé pour fabriquer les masses (sables) de bouchage du dispositif d'ouverture des poches à acier. Le principal fournisseur mondial de sable de chromite est l'Afrique du sud. En Europe, les approvisionnements, ainsi que le prix fluctuent en fonction des conditions d'exploitation dans ce seul pays.

En ce qui concerne les **réfractaires spéciaux**, on peut citer quelques matières premières principales telles que le zircon ($ZrSiO_4$) qui est un produit naturel, la zircone (ZrO_2) issue de la transformation du zircon, le carbure de silicium, le graphite, ... Le zircon (et la zircone), principalement utilisé en verrerie proviennent uniquement de trois localisations dans le monde : l'Afrique du Sud, la Floride (US) et l'Australie. Ces gisements ne sont pas très importants et doivent être préservés. De plus, les disponibilités et les prix fluctuent également en fonction des conditions d'exploitation dans ces pays. Le carbure de silicium est uniquement d'origine synthétique, il est utilisé comme additif dans certains matériaux ou comme matière première principale pour certaines applications comme l'incinération, l'électrolyse de l'aluminium ou certaines zones des hauts fourneaux (ceintures des tuyères). Plus de la moitié de la production mondiale de carbure de silicium est réalisée en Chine.

Le **graphite** est d'origine naturelle mais peut être fabriqué, il est utilisé (30 % du marché total) pour réaliser des réfractaires « carbonés » (sidérurgie) mais également des matériaux massifs (cuves de hauts fourneaux, électrodes pour fours électriques, ...). Les principales sources de graphite sont localisées à Madagascar, au Brésil et en Chine (85 %), dont les 2/3 en Chine.

Alerte / Enjeu N°3 : Des ressources et des technologies ne sont pas suffisantes, il faut aussi de l'expertise, des compétences

La situation de la formation en réfractaires est inquiétante. Comme en Amérique, en Europe, le nombre d'instituts supérieurs d'enseignement et de recherche qui proposent un cursus propre en matériaux céramiques et réfractaires, et/ou qui incluent cette spécialité dans leur enseignement sont très peu nombreux (<5). Ce qui pose un problème majeur de formation et de transmission du savoir et des compétences. Les entreprises ont des grandes difficultés à recruter des cadres formés à ce métier. Par contre, en Chine, de nombreuses universités l'enseignent et des milliers d'étudiants sortent diplômés chaque année.

Recommandations/ Propositions :

La production des produits stratégiques indispensables à notre civilisation actuelle et future (l'acier, les métaux non-ferreux, le ciment, le verre, la chimie, la chaux, les céramiques, ...) est absolument liée aux matériaux réfractaires qui servent à la **construction des outils de production**. Les réfractaires sont donc eux-mêmes des matériaux stratégiques.

Il est donc indispensable que notre société occidentale **garde une maîtrise suffisante de la production de ces matériaux ainsi que des activités de recherche concernant les réfractaires**. Pour cela, il est nécessaire :

- De maintenir un **tissu industriel** suffisant et performant, mais n'est-il pas déjà trop tard ?
- De garder un **niveau de connaissance et de compétence** suffisant, notamment via l'enseignement et la recherche
- D'avoir un **accès « suffisant » (disponibilité et indépendance) aux matières premières** nécessaires à la fabrication des réfractaires et de développer des filières de recyclage.

Il est évident que l'enseignement relatif au sujet est très faible en Europe par rapport à celui pratiqué dans un pays tel que la Chine. Si la recherche dans ce domaine n'est pas négligeable, une culture

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

générale nécessaire pour aborder l'ensemble des problèmes industriels est souvent faible ou est devenue absente chez les utilisateurs.

En Europe, pour certaines catégories de réfractaires il existe des matières premières en abondance. Des gisements ou des productions suffisants sont présents. Cependant, il est évident que pour certains produits performants, des lacunes existent. Les matières premières n'existent pas en Europe, la disponibilité, la qualité et le prix fluctuent constamment. Pour certains une dépendance extra-européenne, totale est évidente.

Il est évident **qu'une indépendance complète de l'Europe par rapport aux autres continents n'est pas possible et n'est pas nécessairement souhaitée**. Cependant, il est nécessaire d'assurer une certaine continuité qui nécessite un minimum de conditions déjà citées ci-dessus.

Pour **diminuer la dépendance**, on peut envisager une série de mesures dont la plupart sont déjà en cours mais doivent être amplifiées et pérennisées :

- L'évaluation et la valorisation de toutes les sources possibles d'approvisionnement
- L'invention et la production de nouvelles matières premières
- L'invention, l'optimisation et l'utilisation de nouveaux matériaux réfractaires
- L'optimisation des procédés de fabrication et d'utilisation des réfractaires
- L'optimisation des procédés de récupération et de recyclage
- Le maintien d'un niveau de connaissance suffisant (enseignement et recherche)

Enfin, il est nécessaire d'insister sur le fait que les différentes autorités doivent jouer un rôle essentiel et être conscientes de la nécessité de soutenir le secteur des matériaux réfractaires et ce en favorisant les 6 points cités ci-dessus.

D'autre part, les **contraintes environnementales** auxquelles vont être inéluctablement confrontées les industries des hautes températures, nécessiteront de mettre en place des **procédés décarbonatés** (par exemple l'utilisation de l'hydrogène). Ces procédés émergents ont des **conséquences majeures sur le choix des réfractaires**. Saurons-nous relever ces défis ? La question reste ouverte.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

2-6 Fabrication additive métallique

Julien ZOLLINGER (IJL) – Frédéric SCHUSTER (CEA) – Bruno CHENAL (Constellium)

Mots Clefs : Métaux, fabrication additive, conception, énergie

Introduction

D'une manière générale, la fabrication additive (FA) se trouve au cœur des grandes transitions : numérique, énergétique et médecine du futur. C'est une technologie de souveraineté qui impacte l'ensemble des secteurs industriels.



Dans une période post-Covid 19, le développement de la fabrication additive apparaît également comme une contribution possible à la relocalisation d'une production industrielle de composants à haute valeur ajoutée et une contribution non négligeable à la constitution de « supply chains » plus résilientes. Lors de la crise du Covid, quelques démonstrations ont été faites de la réactivité de cette technologie pour produire en un temps record des composants de respirateurs, des dispositifs filtrants ou des systèmes de protection individuelle. Les innovations issues de la fabrication additive sont, d'une part, incrémentales lorsqu'il s'agit de reproduire des pièces existantes, et d'autre part, en rupture, grâce aux nouveaux degrés de liberté que permet par exemple l'optimisation topologique des composants.

Dans le domaine de la fabrication additive métallique, le saut technologique que pourrait apporter cette technologie n'a pas encore été franchi totalement et un certain nombre de verrous doivent encore être adressés. On produit encore principalement aujourd'hui des pièces conventionnelles avec des matériaux conventionnels pour lesquels les bénéfices associés proviennent de la réduction des étapes de fabrication (usinage, assemblage) : intégration en une seule étape ou de la possibilité de fabriquer des géométries impossible à réaliser par des moyens conventionnels. Les développements de cette technologie se sont focalisés dans un premier temps sur la mise au point du procédé d'impression (augmentation de la vitesse d'impression, augmentation de la dimension des imprimantes et donc des pièces produites, fiabilité, reproductibilité). En parallèle toute la chaîne numérique s'est développée avec notamment les logiciels de numérisation 3D et l'intégration d'approches d'optimisation topologique. Par contre à ce jour très peu de matériaux ont été spécifiquement conçus en intégrant les spécificités de la FA.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Outre le grand potentiel de réindustrialisation associé à la FA (il est imaginable de (re)convertir des sites sidérurgiques et métallurgiques pour la production de poudres, fils d'apports, etc³), cette technologie et son développement peuvent accompagner des nombreux autres défis sociétaux pour peu que des moyens conséquents soient investis dans la recherche qui y est associé, en particulier dans le domaine des matériaux et de la métallurgie. Les quelques exemples que nous donnerons ici, loin d'être exhaustifs, illustrent cette affirmation.

La réduction du nombre de matériaux et de l'utilisation de métaux stratégiques

Après une explosion du nombre de matériaux dans les objets du quotidien à partir des années 2000, la **raréfaction des ressources et le recours de plus en plus systématique au recyclage imposent pour l'avenir** une tendance inverse, c'est-à-dire la diminution du nombre de matériaux constituant les objets. D'un point de vue métallurgique, cela signifie réduire le nombre de nuances d'alliages tout en conservant *a minima* les propriétés et performances de chaque composant. La FA peut apporter des solutions en permettant la réalisation de pièces plus complexes qui supprimeraient la contrainte de l'assemblage, mais pour lesquels un même matériau devra posséder des propriétés potentiellement différentes dans une même pièce.

Énergie

La FA peut également apporter des solutions aux problématiques associées à la transition énergétique. Encore une fois sans être exhaustif, deux exemples d'actualités

- La mobilité hydrogène : L'accessibilité à cette énergie par le plus grand nombre nécessite la conception de petites unités de production, pour lesquels la FA permettrait de lever les verrous technologiques associés à la complexité géométrique de dispositifs de taille réduite pouvant supporter en service des températures de l'ordre de 1000°C.
- La fusion : Les températures de l'ordre de 15.10⁶ °C atteints lors de la fusion nécessitent des matériaux et assemblages de matériaux complexes et nombreux (Les modules de couverture d'ITER sont par exemple composés de cuivre, d'acier inoxydable et de béryllium) qu'il faut assembler. L'utilisation de matériaux à gradient par FA peut permettre de faciliter leur production et obtenir des propriétés améliorées notamment sur le long terme.

Matériaux et métallurgie

Ces défis montrent la nécessité de développer les connaissances associées à la fabrication additive de matériaux métalliques afin d'en exploiter le plein potentiel en terme de performance / propriétés du matériau. Certaines applications nécessitant des propriétés spécifiques en services, souvent à des températures élevées, avec des procédés encore mal connus sont autant de défis scientifiques et industriels.

La formation des microstructures dans des conditions fortement hors-équilibre avec des gradients thermiques forts et des vitesses de refroidissement très élevées apportent de nouvelles perspectives pour le **développement d'alliage** : l'accès à de nouvelles phases métastables et à des solutions sursaturées, la réalisation de microstructures eutectiques nanométriques orientées, l'utilisation des conditions thermiques locales pour obtenir des microstructures à grains ultra-fins... Ces développements d'alliages nouveaux peuvent également se faire en utilisant majoritairement des matériaux abondants : eutectiques Fe-Ti pour les applications hautes températures, alliages d'aluminium sursaturés avec précipitation nanométriques, la liste est potentiellement longue et

³ La possibilité de convertir un site « haut-fourneau » en tour d'atomisation de grande capacité, ou de modifier une tréfilerie pour la production de bobine d'alliages à haute valeur ajoutée sont des pistes à l'étude.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

reste à explorer. À titre d'illustration, les nouveaux alliages d'aluminium de Constellium, spécifiquement désignés pour la FA, maintiennent leurs caractéristiques mécaniques élevés après FA à des températures où les meilleurs alliages aéronautiques voient les leurs chuter.

L'essor de la FA a aussi révélé l'importance du processus de **fusion** (qui intervient lors du dépôt de chaque nouvelle couche), et qui a été très peu étudiée au contraire de la transformation de phase inverse, la solidification. Encore une fois, les conditions extrêmes associées au procédé et les travaux récents sur le sujet montrent qu'il est possible de passer à l'état liquide sans passer par les phases stables ; ce liquide potentiellement hétérogène de l'échelle atomique à l'échelle mésoscopique va influencer la formation des microstructures de la couche qui va se solidifier. La compréhension de ces phénomènes va nécessiter des avancées aussi bien expérimentales que numériques, allant de l'échelle atomique au millimètre.

Enfin, l'établissement de procédés robustes ne sera possible qu'avec des outils de **modélisation** et de simulation prenant en compte les transformations métallurgiques et le développement des **contraintes** associées au procédés et aux transformations de phase dans le matériau pour être capable de prédire voir de contrôler l'apparition de la fissuration à chaud et la déformation des pièces produites avec cette technologie.

Pour exploiter pleinement tout le potentiel de la fabrication additive, il est nécessaire d'avoir une approche pluridisciplinaire et holistique afin d'optimiser conjointement la métallurgie/les alliages, les poudres/fil d'apport et le procédé d'impression 3D. C'est à partir de ces éléments qu'il sera possible d'alimenter les modèles numériques qui optimiseront alors le design et les fonctions des pièces produites par FA.

Verrous à lever

D'une façon très schématique, 6 familles de verrous doivent être adressées pour un développement industriel massif de la fabrication additive :

- La maîtrise du cycle des matières premières et de son recyclage
- Le design d'alliages spécifiques
- La maîtrise des procédés industriels « du micro au macro » grâce à l'instrumentation et la simulation
- Le développement des outils de conception pour des composants fortement contraints
- La fonctionnalisation intelligente de composants par fabrication additive et intégration de capteurs directement dans les pièces en cours de fabrication (smart fonctionnalisation)
- La maîtrise de la chaîne numérique depuis le design jusqu'au contrôle non destructif des pièces en passant par l'optimisation des procédés par une approche de type Intelligence Artificielle et la constitution de bases de données des matériaux issus de la FA

2-7 Les enjeux de la formation post-pandémie

Mauricio DWEK, Nicolas MARTIN, David MERCIER, Granta Education Division, Material Business Unit, Ansys Inc., Lyon, France

Mots Clefs : enseignement ; logiciel ; matériaux ; simulation ; développement durable ; éco-conception

Constat post-COVID-19 sur le thème de la formation

Œuvrer dans le domaine de la formation est un défi de projection et d'anticipation des enjeux futurs. Qu'il s'agisse des étudiants au primaire, secondaire ou dans l'enseignement supérieur, il est nécessaire de prévoir quelles compétences leur seront pertinentes à l'issue de leur parcours. L'avènement d'une pandémie, un fait inédit depuis quelques générations, bouleverse les programmes et les priorités, rebattant en partie les cartes méthodologiques et curriculaires.

Certaines tendances comme la virtualisation des enseignements et du travail se voient propulsées au premier plan, devançant largement leur échéance initiale. On observe également une accélération de certaines préoccupations liées aux questions environnementales et sociales (Commissariat général au développement durable, Modes de vie et pratiques environnementales des Français, 2018), peut-être due à la mise à nu de la fragilité de certains équilibres, notamment dans les échanges commerciaux et les chaînes d'approvisionnement. La crise multiforme provoquée par la COVID-19 incite ainsi à des réflexions sur certaines pratiques sociétales en ouvrant des pans pour incorporer de nouveaux supports et contenus dans la formation, où il est évident que les matériaux joueront encore un rôle essentiel dans les années à venir.

La préparation de l'après COVID-19 requiert une réflexion sur les enjeux liés aux matériaux auxquels il faudra former les futurs chercheurs, ingénieurs et scientifiques de tous les horizons. Parmi les expériences menées et subies pendant la crise, certaines pratiques du passé semblent tendre vers la désuétude alors que de nouveaux comportements se dessinent. Les thèmes liés à la prophylaxie, à la rareté des ressources naturelles et la gestion des chaînes d'approvisionnement, ainsi qu'à la transition écologique, prennent le devant de la scène. Ainsi, il paraît judicieux de s'intéresser à comment intégrer les contraintes de santé et d'usages durables de ressources dans la formation des ingénieurs et scientifiques, soulignant l'importance des matériaux pour les technologies nécessaires post-COVID-19. Trois enjeux principaux sont mis en avant ici pour l'enseignement des matériaux et procédés dans ce contexte : sensibiliser à des matériaux et à des procédés avancés pour des enseignements interdisciplinaires, monter en compétence dans l'usage du numérique et de la simulation pour des problématiques multi-physiques, et intégrer dans la formation universitaire des outils liés au développement durable et à l'éco-conception.

Enjeu N°1 : Sensibilisation à des matériaux et procédés avancés

La pandémie de la COVID-19 a notablement modifié nos pratiques depuis début 2020 et d'autant plus dans nos interactions avec notre environnement proche. Concernant les interactions entre personnes, des simulations numériques ont permis par exemple de comprendre les mécanismes de transmission du virus dans l'air entre 2 individus à proximité et donc d'établir des règles simples de distanciation sociale permettant de minimiser le risque de contamination (Ansys, Facing COVID-19 Challenges With Our Customers and Partners, 2020) (Feng, Marchal, Sperry, & Yi, 2020). Toutefois, concernant nos interactions avec des objets, il nous est difficile de mettre cette distanciation en place, étant donné que l'être humain n'a pas par défaut le pouvoir de télékinésie et que la technologie manque sur le terrain pour établir plus d'interactions et communications à distance (utilisation de caméras et détecteurs par exemple pour l'ouverture des portes...).

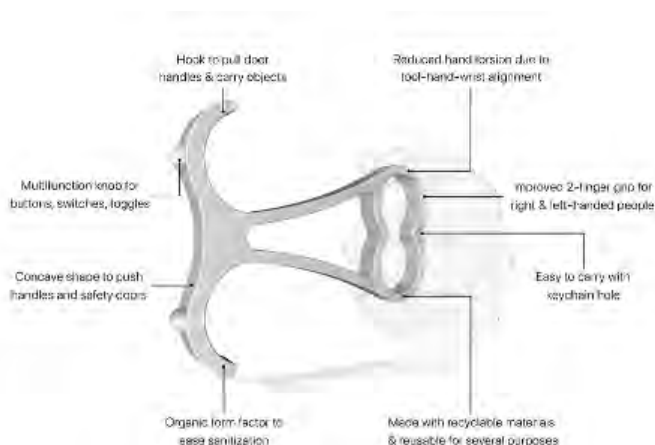
Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Dans ce contexte, de nombreuses idées innovantes en lien avec le monde des matériaux et procédés ont émergé ces derniers mois pour faciliter les échanges directs d'objets entre personnes ou pour éviter des contacts physiques indirects (cas de la poignée de porte), permettant a priori de limiter la propagation rapide du virus. Dans un premier temps, nous pouvons citer par exemple l'utilisation du cuivre naturellement biocide (bactéricide et virucide), pour la fabrication de poignées (Ansys, Copper Kills Germs? Yes, So Start Designing with It!, 2020) (Fleurentin, 2020) ou sous forme de particules en dispersion dans une peinture pour protéger des surfaces (lunettes de toilettes, barres de maintien...) (MetalSkin, 2020). Notons que dans le cas du cuivre massif pour la fabrication d'objets du quotidien, la conception et les procédés de fabrication jouent un rôle essentiel pour minimiser le coût économique (Australian Defence Magazine, 2020).



Can copper kill germs? Well, a study shows that using it on hospital surfaces could reduce infection rates by 58%.

Nous pouvons également discuter dans un deuxième exemple, de la conception d'outils de préhension développés récemment pour manipuler des objets du quotidien sans risque de contact direct (François, Bonnet, Kosior, Adam, & Khonsari, 2020) (Zallio, 2020) (Serge Ferrari, 2020). Ces nouveaux outils, pour la plupart réalisés par différentes techniques d'impression 3D, ont nécessité le plus souvent un travail amont de conception pour optimiser la forme et donc pour minimiser la quantité de matière utilisée, tout en maximisant l'ergonomie de l'outil. Ces outils multifonctions sont réalisés en général en polymère inerte pour réduire le coût de fabrication et leurs plans sont parfois directement accessibles en ligne pour en faciliter l'usage auprès du grand public. La fabrication additive a par ailleurs permis que plusieurs *fab labs* et autres lieux dédiés au prototypage rapide se lancent promptement dans la production de visières de protection pour le personnel soignant lors du pic de la crise sanitaire. Ces efforts ponctuels et massifs de réorientation de la production ont été favorisés par l'agilité de cette technologie et des organismes qui les emploient.



Mais finalement, malgré cette extraordinaire adaptation de la société pour faire face à certains problèmes liés à la pandémie, de nombreuses questions persistent ou apparaissent sur les choix de matériaux et des procédés en lien avec le développement de ces nouvelles technologies. De plus, notre manque de recul sur la fiabilité de ces nouveaux produits et outils souvent composites, architecturés et multi-matériaux, réalisés à la suite d'une conception peut-être trop rapide (procédé mal maîtrisé ou manque de connaissances sur le matériau mis en forme...) (Novak & Loy, 2020) ou simplement sur un mauvais choix de matériaux (problème d'approvisionnement en matière première, recyclabilité...) (Kalyaev, Salimon, Korsunsky, & Denisov, 2020), ne fait qu'accentuer des problèmes déjà existants.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Recommandations/ Propositions :

Proposer des enseignements et activités interdisciplinaires

Il est clair que ces nouveaux développements lors de la pandémie, nécessitant de la part des ingénieurs-chercheurs des connaissances poussées sur les matériaux et procédés et des compétences multi-physiques, entraîne certaines formations actuelles à aborder des nouveaux cas d'étude plus transverses et à tendre vers plus d'interdisciplinarité, comme par exemple :

- Initier des futurs ingénieurs mécaniciens à des problématiques de bio-ingénierie et donc aux propriétés de biocompatibilité des matériaux
- Etoffer les cursus d'ingénieurs matériaux en abordant le monde des matériaux naturels ou des propriétés biologiques
- Confronter les étudiants à des problématiques réelles, avec des cahiers des charges complexes multi-objectifs comprenant de plus en plus de contraintes (mécanique vs biologique, sanitaire, recyclabilité, approvisionnement, toxicité...).

Sensibiliser les étudiants à de nouveaux matériaux ou de nouvelles techniques de fabrication

La conception de matériaux hybrides (composites ou architecturés) ou encore des procédés avancés (e.g. les traitements de surface, la fabrication additive...) sont autant de solutions technologiques qui ont permis depuis plusieurs décennies d'être de plus en plus innovants et performants dans de nombreux secteurs industriels (génie civile, aérospatiale, bio-ingénierie, automobile, sport...). Il est donc primordial d'intégrer dans les formations scientifiques universitaires et cursus ingénieur des outils pédagogiques de pointe et à jour sur ces avancées technologiques pour actualiser leurs enseignements. Les performances et la fiabilité de systèmes conçus à l'aide de ces nouvelles technologies peuvent également servir de matière à discussion pour aiguïser le sens critique des étudiants, afin d'éviter une adoption systématique et trop rapide de ces dernières. Que ce soit par le biais de bases de données matériaux/procédés à jour, ou de logiciels aidant à la modélisation analytique et numérique, ou encore que ce soit par la création de ressources pédagogiques, il est devenu crucial que les formations scientifiques se penchent sur ces nouveautés, non pas que dans des spécialisations de fin de parcours mais comme sujet intégrateur des socles communs, pour éviter de créer des fossés de connaissances entre le monde universitaire et les industries/centres de recherches.

Enjeu N°2 : Les matériaux numériques et la simulation dans l'enseignement

La simulation numérique multi-échelle et multi-physique devient omniprésente dans notre société et se présente comme une solution inéluctable pour les générations futures d'ingénieurs que ce soit dans les domaines de l'enseignement, de la recherche ou de l'industrie. Gain d'argent, gain de temps et surtout optimisation et fiabilisation des systèmes avec une compréhension locale et globale des mécanismes mis en jeu pour un problème donné, cette approche virtuelle tend ainsi à se démocratiser, notamment grâce à des outils de plus en plus performants (Hendrickson, 2017) :

- Interfaces des logiciels optimisées et simplifiées
- Amélioration technique des supports (ordinateurs, serveurs, cartes graphiques...)
- Assistance de l'utilisateur grâce à des fonctionnalités autonomes (maillages automatique, modèles prédéfinis, intelligence artificielle...)
- Paramétrisation, concrétisation et surdéfinition des modèles numériques, entre autres

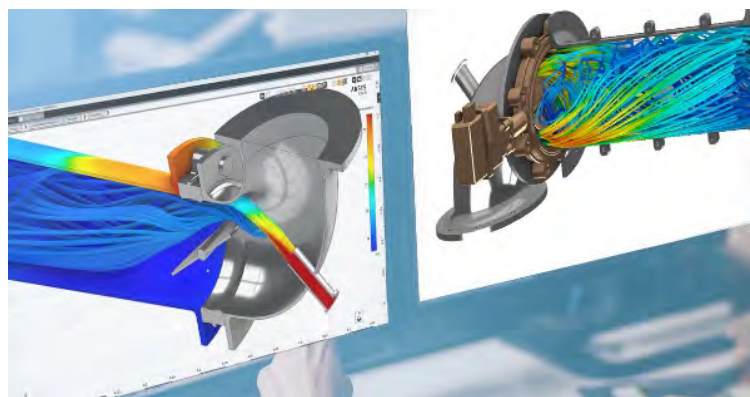
Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Toutefois, cette approche nécessite une prise de recul et une analyse de la part de l'ingénieur, concernant les valeurs d'entrée pour le modèle et sur les résultats obtenus. Pour cela, une très bonne gestion des données matériaux, couplée à une connaissance poussée de leurs utilisations est obligatoirement requise de la part des ingénieurs modélisation (Rappaz, 2003). Ainsi, que ce soit à l'échelle du laboratoire ou à l'échelle d'un groupe industriel mondial, construire des bases de données de référence pour les matériaux est un enjeu considérable afin de capitaliser et pérenniser les connaissances, pour avoir les ressources nécessaires dans des projets de modélisation numérique. Ces banques de données de matériaux numériques se doivent d'être référencées, vérifiées, examinées, et mises à jour régulièrement afin de minimiser le risque d'erreurs, mais surtout représentent un travail considérable de capitalisation du fait de la quantité de données en jeu (propriétés intrinsèques et extrinsèques, propriétés à l'échelle des atomes ou de la microstructure, données en fonction de la température ou des procédés utilisés, différents systèmes d'unité et différentes langues, etc.) (Rumble Jr, 2017). Pour réaliser et gérer de telles banques de données, de nombreuses solutions logicielles sont développées (Hill, 2016) et il est souvent nécessaire d'établir des collaborations internationales pour aboutir à de meilleurs résultats en termes de contenu (e.g. base de données pour la fabrication additive (SENVOL, 2019)) ou en termes de schéma/architecture de données (projet européen AMAZE (European Commission, 2017)). Ces enjeux deviennent alors plus que critiques lors de périodes de pandémie comme celle pour la COVID-19, vues les contraintes temporelles et problèmes de communication entre différentes équipes travaillant sur le développement d'un nouveau produit ou sur une modification/optimalisation d'un produit existant. Enfin, cette période de confinement en 2020 en France a également poussé les chercheurs et industriels à travailler à distance, loin des laboratoires avec leurs bibliothèques papier et parfois sans facilité d'accès à des serveurs informatiques, d'où des points importants d'amélioration à mettre en avant dans le cas où des périodes de confinement seraient à nouveau instaurées. La question de gestion des données numériques peut être également étendue à l'enseignement et donc à savoir comment communiquer avec et auprès des étudiants dans la formation sur les matériaux et la modélisation numérique ?

Recommandations/ Propositions :

Enseigner à distance à partir de cas réels

L'utilisation de logiciels de simulation et de bases de données numériques permet tout d'abord de soutenir un enseignement à distance et une virtualisation de la pédagogie, ce qui est inévitable en période de confinement ou de télétravail imposé. De plus ces outils représentent un excellent support pour la mise en œuvre de méthodologies d'apprentissage actif, en particulier les projets intégrateurs



où les étudiants sont amenés à faire converger plusieurs compétences. Les compétitions étudiantes comme les courses de véhicules ou bateaux solaires sont également des occasions pour mettre en application des connaissances acquises en cours et rapprocher les futurs ingénieurs ou scientifiques des démarches de projet présentes dans des contextes professionnels.

La discussion en classe à partir de cas d'études est aussi une tendance qui semble de plus en plus adoptée et appréciée par les enseignants. Lors d'une journée utilisateurs récente, des professeurs

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

employant le logiciel Ansys Granta EduPack dans leurs enseignements liés aux matériaux ont indiqué que les cas d'études et micro-projets disponibles sur le site de ressources pédagogiques du logiciel étaient leur support de cours privilégié pour stimuler les étudiants en cours (Granta, 2020). Ces approches permettent à la fois de traiter des sujets interdisciplinaires, de confronter les notions théoriques à des cas pratiques issus de la réalité, mais aussi d'acquérir des compétences et méthodologies professionnelles spécifiques par rapport aux logiciels.

Étendre la portée des projets et études menés par les étudiants

Il est possible aujourd'hui de proposer aux étudiants des projets couplant plusieurs modèles, méthodes et aptitudes grâce aux logiciels de simulation. L'étude d'une pompe, par exemple, pourra s'appuyer sur des calculs numériques structurels et fluidiques, à partir d'un projet conçu en 3D et pour lequel les matériaux auront été choisis dans une base de données. Les étudiants peuvent ainsi apprendre en explorant, dans un terrain de jeu propice à l'innovation. Ces solutions de laboratoires virtuels certes ne remplacent pas entièrement les travaux pratiques en vrai, mais elles peuvent ouvrir un espace plus flexible et pratique (voire moins coûteux) pour des applications spécifiques.

L'utilisation d'outils numériques et de logiciels de simulation permet aussi d'englober davantage de paramètres, notamment en matière de développement durable. La réalisation d'analyses de cycle de vie, étape fondamentale de l'éco-conception, serait impossible sans de conséquentes bases de données et les logiciels pour les exploiter, par exemple. L'allègement de structures, qui allie également choix de matériaux et simulation, peut aujourd'hui notamment faire l'objet d'optimisations topologiques en lien avec la fabrication additive dont les bénéfices d'une intégration dans l'enseignement commencent à être soulignés (Tumkor, 2016).

Enjeu N°3 : La formation au développement durable et à l'éco-conception

Il s'agit de thèmes qui ont beaucoup progressé dans les 20 dernières années et dont l'importance et l'intérêt semblent augmenter de manière accélérée. Cela s'est vu dans la sphère politique, avec des résultats importants aux élections européennes de 2019 et aux municipales françaises de 2020 (Monde, 2020). Le monde industriel donne aussi l'impression d'une prise de conscience avec davantage d'investissements responsables et éthiques, plus de réglementations environnementales en matière d'économie circulaire (en Europe du moins), des accords sectoriels promouvant des énergies non-carbonées, notamment pour l'automobile, avec des échéances claires même si avec peu de mesures coercitives.

L'émergence des écologistes

Evolution des scores par familles politiques **aux élections municipales en 2020 par rapport à 2014** (calcul à partir du nombre de voix au premier tour en cas d'élimination ou au second tour en cas de qualification)



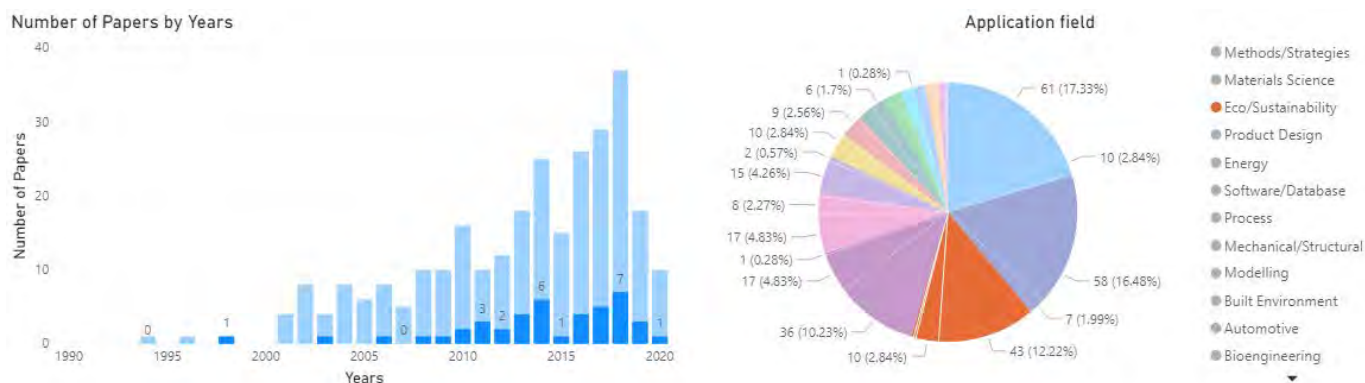
SOURCE : MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR.

LP/INFGROPHIE AVEC VICTOR ALEXANDRE

Dans la recherche et l'enseignement en matériaux, l'intérêt est nettement grandissant, surtout depuis 2010. Cela provient tout d'abord des demandes du monde du travail, qui poussent à former plus de professionnels ayant des compétences d'analyse englobant les dimensions économiques,

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

sociales et environnementales liées aux matériaux et processus d'ingénierie. Mais on observe également une certaine attente des nouvelles générations d'étudiants concernant l'application des sciences et technologies dans la résolution des enjeux de taille que sont la transition énergétique, l'épuisement des ressources naturelles, et le passage à des modes de production et de consommation plus respectueux des écosystèmes et populations. Une analyse récente sur les articles citant le logiciel Granta Selector pour la sélection de matériaux et qui abordent le développement durable ou l'éco-conception montre une nette augmentation dans la dernière décennie (voir figure ci-dessous), avec par exemple un ratio de près de 19% pour l'année 2018 (soit 1 article sur 5) (Granta, 2020).



Il semble alors naturel, étant donnée la convergence entre le besoin sociétal et les aspirations des étudiants et enseignants-chercheurs, que la formation post-COVID-19 apporte des connaissances et des outils qui puissent soutenir ces initiatives.

Recommandations/ Propositions :

Enseigner les risques liés aux chaînes d'approvisionnement

Le confinement en France et en Europe ainsi que l'état d'alerte sanitaire subséquent ont mis à nu la fragilité et l'instabilité des chaînes d'approvisionnement des matières premières et matériaux. Bien au-delà du domaine médical très médiatisé (masques, gants, médicaments...) plusieurs sortes de pénuries dans différents secteurs sont apparues: celles liées à notre consommation de produits et matériaux venant d'autres continents, notamment de l'Asie ; celles liées à la mise à l'arrêt des échanges commerciaux pour cause de frontières fermées et main d'œuvre indisponibles; celles liées à une brusque surconsommation (farine consommée à la maison plutôt qu'en restaurant/boulangerie/pâtisserie, besoins en équipement électronique et informatique pour la généralisation du télétravail...) (Kalyaev, Salimon, Korsunsky, & Denisov, 2020).

Ceci révèle les vulnérabilités de nos habitudes et de notre système de consommation, fonctionnant constamment à flux tendu, coincés dans une spirale de la course au prix, à l'instantanéité, à l'accessibilité au détriment de la recherche de qualité, de résilience et de l'appréciation de la valeur. C'est aussi le témoin d'un manque de connaissances et d'éducation sur les matériaux, leurs approvisionnements et les limites physiques de ressources finies et dispersées de la planète. Ce coup d'arrêt entraînera-t-il une réflexion sur comment transitionner vers une industrie et société résilientes et plus responsables à travers une meilleure consommation de matériaux ?

Depuis le confinement, l'espace médiatique fournit plus de place pour aborder ces problématiques et donner de la visibilité à ceux qui s'y penchent depuis longtemps. A titre d'exemple, l'ADEME publie régulièrement des dossiers et expertises qui préconisent de produire et consommer autrement, favoriser l'économie circulaire, ou des prospections énergie matière (Agence de la Transition

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Ecologique, 2020). De son côté le *think tank* “The Shift Project” propose de cartographier la dépendance de la France aux flux de matières des grands secteurs tels que l’industrie lourde, l’automobile, le secteur du bâtiment et travaux publics. ou encore l’énergie, dans le but de comprendre leurs interdépendances dans la consommation de matériaux et d’énergie, et pour coordonner des décisions vers plus de résilience dans les crises à venir (The Shift Project, 2020). Dans ce cadre, des partenariats académiques avec “The Shift Project” voient le jour, comme celui par exemple initié par le réseau INSA (Institut National des Sciences Appliquées) (INSA, 2020). Nous pouvons aussi recommander des initiatives telles que le MOOC (Massive open online course) SusCritMat, soutenu par l’UE qui sensibilise étudiants et professionnels aux éléments du tableau périodique dits critiques et à leur approvisionnement (SusCritMOOC Online Training 2020, 2020).

Il est légitime de se poser la question : est-ce que l’année 2020 marque la fin des matériaux les plus performants « à tout prix » (coût, impact environnemental, impact sociétal, dépendance géopolitique et logistique) ? Notre rapport à la conception de produits doit prendre en compte une nouvelle hiérarchie des critères de sélection de matériaux, qui va au-delà de ses seules caractéristiques techniques : disponibilité en France ou en Europe, économie circulaire et réemploi de la matière, etc. Seule une approche système permet cette prise en compte et n’est que peu enseignée en ingénierie à ce jour. Il est difficile néanmoins de transmettre ou enseigner cette approche car elle-même n’est pas entièrement consolidée. Pour de tels cas, le fonctionnement en classe inversée semble être plus adaptée, avec des débats nourris et facilités par les enseignants, tirés d’exemples réels d’applications.

Intégrer des outils liés à la transition écologique et à l’économie circulaire

La thématique de la transition écologique est un terrain de jeu idéal pour développer les compétences liées à l’analyse de systèmes complexes et multidisciplinaires. Les objectifs de développement durable proposés par les Nations Unies sont une excellente source de sujets à traiter dans les formations et apparaissent déjà dans les programmes et directives adressées aux établissements du secondaire et de l’enseignement supérieur (Commissariat général au développement durable, Objectifs de Développement Durable, 2020). Tout de même, il s’agit de thèmes qui, intrinsèquement, requièrent la capacité de gestion d’objectifs multiples et parfois contradictoires. Il faut également savoir analyser ces problématiques d’un point de vue sociotechnique, à partir d’une vision intégrant sciences humaines, sciences de la vie et sciences de l’ingénieur.

Dans ce sens, le choix de matériaux est une étape qui acquiert ainsi une importance capitale car c’est le carrefour permettant de rassembler les dimensions ci-dessus suffisamment en amont lors de la conception de produits pour éviter un maximum de dégâts, de manière efficace. Promouvoir une méthodologie rationnelle de sélection de matériaux éco-responsables semble essentiel et répond à une demande provenant de la société et en particulier des étudiants et futurs concepteurs de solutions technologiques. C’est également le moment idéal pour insérer la pensée du cycle de vie de manière pratique, en proposant des réflexions sur les étapes d’extraction, de fabrication, d’usage et de fin de vie des matériaux et produits.

La difficulté réside dans l’intégration de ces volets supplémentaires dans les cursus universitaires déjà bien chargés et non extensibles en heures. Cela doit sûrement aller de pair avec une évolution méthodologique de la pédagogie, qui ferait appel régulièrement à des projets pour favoriser le développement de connaissances par exploration nécessaires à la résolution de problèmes systémiques. L’ajout de dimensions économiques, sociales, environnementales, géopolitiques ou même culturelles dans les analyses proposées dans les cours ainsi que dans les projets menés par les étudiants est une voie de développement. Il est ainsi possible d’envisager la discussion des matériaux critiques dans les cours portant sur les propriétés magnétiques des matériaux ou liés aux énergies

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

alternatives (par rapport aux terres rares), ou d'intégrer l'éco-conception systématiquement dans les projets de fin d'études, par exemple. Certains établissements proposent des travaux pratiques de démantèlement de produits pour conduire des analyses de type *reverse engineering* qui permettent d'allier caractérisation et choix de matériaux et se pencher sur la chaîne de valeur en amont ainsi que les exutoires des matières en aval.

Il existe de nombreux logiciels permettant de conduire des analyses de cycle de vie ou des choix de matériaux en conception pour soutenir ces enseignements. Ils reposent sur des bases de données souvent conséquentes contenant les diverses propriétés des matériaux ainsi que différents indicateurs d'impacts sociaux et environnementaux. Cependant, alors que le volet environnemental bénéficie de quelques décennies d'évolution et d'une intégration dans les programmes universitaires, la dimension sociale reste quelque peu adressée. Ashby et Vakhitova ont récemment développé un prototype d'outil d'évaluation d'impacts sociaux du cycle de vie qui a pour vocation mettre en lumière les indicateurs proposés par les directives des Nations Unies, et qui pourrait à terme intégrer le logiciel pédagogique Ansys Granta EduPack (Ashby, 2019).

Conclusion

Il est toujours délicat de proposer des analyses et des recommandations à chaud, tandis que les phénomènes observés sont encore en train de se dérouler. En ce qui concerne la formation des ingénieurs, scientifiques et professionnels de tous genres, la pandémie de COVID-19 n'aura peut-être pas provoqué de grands bouleversements ou changements de cap lorsqu'elle touchera sa fin. Il semblerait tout de même qu'elle ait accéléré certains mouvements déjà en cours comme le passage à des enseignements numérisés ou virtuels. L'appréhension des équilibres fragiles qui maintiennent l'économie et l'écologie s'est aussi invitée sur le devant de la scène et devrait être davantage discutée dans les activités proposées en cours. Il faut ainsi profiter des réflexions suscitées par cette crise pour approfondir l'implémentation de nouvelles technologies, méthodologies et contenus dans les formations permettant le développement d'innovations qui augmentent la durabilité et la résilience du tissu industriel.

Références

- Agence de la Transition Écologique. (2020). Récupéré sur <https://www.ademe.fr/>
- Ansys. (2020). *Copper Kills Germs? Yes, So Start Designing with It!* Récupéré sur <https://www.ansys.com/blog/copper-kills-germs-design>
- Ansys. (2020). *Facing COVID-19 Challenges With Our Customers and Partners.* Récupéré sur <https://www.ansys.com/about-ansys/covid-19-simulation-insights>
- Ashby, M. (2019). Social Life-Cycle Assessment and Social Impact Audit Tool – A White Paper.
- Australian Defence Magazine. (2020). *Australian company 3D-prints anti-microbial copper.* Récupéré sur <https://www.australiandefence.com.au/news/australian-company-3d-prints-anti-microbial-copper>
- Commissariat général au développement durable. (2018, Avril). *Modes de vie et pratiques environnementales des Français.* Récupéré sur <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Modes%20de%20vie%20et%20pratiques%20environnementales%20des%20Fran%C3%A7ais.pdf>
- Commissariat général au développement durable. (2020). *Objectifs de Développement Durable.* Récupéré sur <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/>
- European Commission. (2017). *Additive Manufacturing Aiming Towards Zero Waste & Efficient Production of High-Tech Metal Products.* Récupéré sur <https://cordis.europa.eu/project/id/313781>
- Feng, Y., Marchal, T., Sperry, T., & Yi, Y. (2020). Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: A numerical study. *Journal of Aerosol Science*, 105585.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

- Fleurentin, A. (2020). *NEWSLETTER N°48 – METALLURGIE SANITAIRE LE CUIVRE, SES ALLIAGES ET LA LUTTE MICROBIENNE*. AFM.
- François, P.-M., Bonnet, X., Kosior, J., Adam, J., & Khonsari, R. (2020). 3D-printed contact-free devices designed and dispatched against the COVID-19 pandemic: The 3D COVID initiative. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*.
- Granta, A. (2020). *Material Intelligence with Ansys Granta*. Récupéré sur <https://www.ansys.com/products/materials>
- Hendrickson, J. (2017). Récupéré sur Ansys: <https://www.ansys.com/about-ansys/advantage-magazine/volume-xi-issue-3-2017/ansys-discovery-live-real-time-simulation-revolution>
- Hill, J. (2016). Materials science with large-scale data and informatics: Unlocking new opportunities. *MRS Bulletin*, 399-409.
- INSA. (2020). Récupéré sur <https://www.insa-lyon.fr/fr/actualites/former-tous-etudiants-aux-enjeux-climat-energie-groupe-insa-ouvre-partenariat-avec-shift>
- Kalyaev, V., Salimon, A., Korsunsky, A., & Denisov, A. (2020). Fast Mass-Production of Medical Safety Shields under COVID-19 Quarantine: Optimizing the Use of University Fabrication Facilities and Volunteer Labor. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 3418.
- MetalSkin. (2020). Récupéré sur <https://metalskin.eu/en/home-english/>
- Monde, L. (2020). *Municipales 2020 : avec EELV, une vague verte historique déferle sur les grandes villes françaises*. Récupéré sur https://www.lemonde.fr/politique/article/2020/06/29/municipales-2020-une-vague-verte-historique-deferle-sur-les-grandes-ville-francaises_6044496_823448.html
- Novak, J., & Loy, J. (2020). A critical review of initial 3D printed products responding to COVID-19 health and supply chain challenges [version 1; peer review: 3 approved]. *Emerald Open Research*.
- Rappaz, M. (2003). *Numerical Modeling in Materials Science and Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- RumbleJr, J. R. (2017). Accessing Materials Data: Challenges and Directions in the Digital Era. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 172-186.
- SENVOL. (2019). Récupéré sur <http://senvol.com/>
- Serge Ferrari. (2020). Récupéré sur <https://www.sergeferrari.com/fr-fr/technologie-antivirale>
- SusCritMOOC Online Training 2020. (2020). Récupéré sur <https://suscritmat.eu/suscritmooc-online-training-2020/>
- The Shift Project. (2020). Récupéré sur <https://theshiftproject.org/en/home/>
- Tumkor, S. (2016). Educational challenges in Design for Additive Manufacturing. *ASEE 123rd annual conference*. New Orleans.
- Zallio, M. (2020). *Handy*. Récupéré sur <https://www.matteozallio.com/handy>

2-8 Sur la réindustrialisation et les matériaux pour l'indépendance économique de la France

François MUDRY

Mots Clefs : industrie, indépendance nationale

Constat Post COVID sur le thème

La France dispose encore de bonnes industries dans le domaine. Cependant le management est fréquemment international ou à l'étranger. Les arbitrages sont donc souvent soumis à des aléas sur lesquels notre pays a peu de poids. On ne voit pas trop la possibilité qu'ait l'Etat de revenir sur cet état des choses. Un soutien bienveillant aux groupes qui restent largement sous management français (ou, au moins européens) est donc nécessaire (ex : Aubert & Duval...).

Beaucoup de ces groupes ont conservé une R&D significative en France. Ceci provient de la qualité de nos formations et de celle de notre R&D publique mais aussi de l'efficacité de certains dispositifs incitatifs : le crédit d'impôt recherche et les CIFRE, notamment. Certaines voix ont expliqué que l'argent « dissipé » dans lesdits dispositifs seraient mieux employée à soutenir la R&D publique qui crie famine. Pour le domaine des matériaux, revenir sur ceux-ci reviendra à fermer les centres de recherches qui sont restés sur notre territoire et à assécher encore plus la recherche publique car il y a ici une longue tradition de collaboration privé-publique dans ce domaine.

Alerte / Enjeu N°1: Pour une bonne utilisation du soutien de l'État

Recommandation/ Proposition : Ce qui serait possible serait d'associer au crédit d'impôt, sous une forme à voir, un certain droit de regard sur les décisions qui sont prises pour l'industrialisation des découvertes faites en France avec le soutien indirect du crédit d'impôt recherche.

Recommandation/ Proposition : L'objectif de redémarrage de l'économie devrait permettre une certaine stabilisation des budgets R&D des industries du domaine en France grâce à des avances remboursables, par exemple. En effet, lorsqu'il y a un trou d'air sur le cash, c'est souvent cette activité qui en fait les frais, notamment la partie des dépenses externes vers la R&D publique.

Alerte / Enjeu N°2: les matériaux sont aussi une opportunité pour le futur

Recommandation/ Proposition : Le développement de l'économie circulaire ouvre une nouvelle possibilité (assez modeste) de produire plus localement et pourrait permettre le démarrage de certaines start-up un peu risquées dans le domaine. Il en est de même pour les développements qui sont faits autour de certaines technologies telles que les nanomatériaux, les matériaux pour la santé, etc... La priorité mise par l'État sur la transition numérique et les biotechnologies ne doit pas assécher les financements nécessaires pour l'innovation industrielle dans le domaine des matériaux. Les rares expériences auprès de la BPI pour des dossiers d'innovation dans le domaine des matériaux ne rendent pas très optimistes à ce jour.

Alerte / Enjeu N°3: Les matériaux sont au cœur de la transition écologique

Recommandation/ Proposition : Transition énergétique

Les matériaux sont souvent un verrou important pour le développement des techniques autour de la production d'énergie. On peut citer les engrenages et les pales d'éoliennes, les nouveaux matériaux pour des cellules photovoltaïques à haut rendement, etc. On peut également améliorer la sûreté des

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

centrales nucléaires qui resteront encore un certain temps un très bon moyen de faire de l'électricité sans CO2. Les matériaux sont aussi très importants pour diminuer la consommation d'énergie dans les transports ou dans le bâtiment.

Recommandation/ Proposition : les challenges environnementaux

Outre les aspects de transition énergétique déjà évoqués, plusieurs voies d'innovation sont possibles pour Les économies de matières premières et l'économie circulaire. Outre les progrès constants d'économies d'énergie et de matières premières en améliorant les produits et les procédés, on citera des techniques plus en développement, par exemple, les nouvelles techniques de fabrication additive qui permettent de réaliser des pièces avec nettement moins de matières premières. L'économie circulaire est certainement la voie la plus prometteuse dans le domaine des matériaux. Elle se heurte d'abord aux conditions de marché actuelles. Les développements technologiques disponibles pourraient déjà d'aller beaucoup plus loin. La rentabilité économique n'y est souvent pas. Il s'agit d'un sujet difficile sur le plan économique et politique. En effet, de multiples acteurs sont concernés le long de la chaîne circulaire (d'ailleurs souvent à construire). Chacun d'eux doit pouvoir se payer. Il serait important de développer l'analyse économique des différents cycles qu'on pourrait imaginer afin de discerner les actions Incitatives, réglementaires ou fiscales que pourraient mettre en place l'État.

2-9 Enjeux et défis pour les matériaux

Olivier DELCOURT (Safran)

Mots Clefs : Procédés, modélisation, revêtements, économie circulaire

Nous avons probablement en France **un des meilleurs réseaux académiques capable de développer des matériaux performants**. La question est notre capacité à travailler en tri-parties entre un laboratoire, un fournisseur de matière, et un donneur d'ordre. Cette approche est d'autant plus compliquée que les fournisseurs de matière français, voire européens, sont de plus en plus rares ... Parmi les nouvelles approches, la « **métallurgie numérique** » se développe mais avec du retard par rapport aux États-Unis qui a consacré beaucoup de budget ces 10 dernières années. Cette méthodologie doit conduire à développer plus vite (moyennant des moyens d'élaboration petites échelles), et déposer davantage de brevets.

Le développement de matériaux performants passe aussi et surtout par la **maîtrise des procédés de transformation**. Les **modélisations** constituent encore une fois une source de progrès considérable dans ce domaine. Au-delà des modélisations « fines » (compréhension des phénomènes physiques), l'enjeu est de **développer des outils utilisables par nos services de méthodes industrielles**. L'objectif est d'aider à la mise au point de gammes industrielles, expliquer des dérives, ou encore trouver des sources de réduction des coûts. Les données de sortie de telles simulations sont par exemple des niveaux de déformations de pièces ou des caractéristiques métallurgiques. Au-delà de la simulation numérique, **le déploiement de l'IA va nous permettre de beaucoup mieux maîtriser la paramétrie de nos installations industrielles**. Un avertissement toutefois : cette approche d'exploitation de données ne pourra se faire qu'avec le support d'experts matériaux (pour l'interprétation). On intercepte beaucoup de communication sur l'industrie 4.0, mais il faut désormais passer à l'acte ! Les plateformes procédés telles que celles des centres techniques ou des IRT sont parfaitement adaptées pour cela.

Dans ce contexte qui associe le numérique à l'expérimental, la formation de nos ingénieurs doit évoluer. Pour nos métiers, **l'ingénieur de demain devra posséder une double compétence : une compétence sur les matériaux et les modélisations associées**.

3^{ème} axe essentiel : la **connaissance du comportement des matériaux**. Là encore la modélisation est au centre de la problématique. Nous avons en France probablement les meilleures écoles dans ce domaine : Mines, ENSAM, ENSMA, ENS, ONERA... L'évolution des **moyens de caractérisation** permettent aujourd'hui de réaliser des simulations à partir de structures réelles en 3D. On est également capable d'observer le matériau sous sollicitation in-situ. Ce domaine de compétence doit absolument être pérennisé. Comme pour les procédés, ces simulations doivent s'appuyer sur des essais représentatifs des conditions d'usage. Cela nécessite le développement de bancs spécifiques pour lesquels la France n'est pas toujours bien placée pour leur réalisation (manque de prestataires dans ce domaine).

Autre réflexion, le **domaine des revêtements** trop souvent négligé, doit se renforcer au regard des enjeux. Très peu de pièces technologiques sont finalement utilisées sans revêtements ou finitions diverses. Au-delà des protections corrosion, des besoins grandissants voient le jour pour répondre à des besoins fonctionnels spécifiques. Pour l'aéronautique c'est par exemple, l'anti-icing, l'anti-érosion, la protection foudre, la tribologie, l'anti-virus, la protection au feu... Le revêtement doit être considéré comme un système avec son substrat. Pour répondre à ces besoins il est indispensable de développer des procédés adaptés, être capables de caractériser les couches, être capables de les tester.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Enfin, la métallurgie française doit être au rendez-vous des **nouvelles technologies**. Je pense en particulier au développement de l'électrique. Par exemple la métallurgie des poudres et la fabrication additive vont permettre de développer des matériaux nouveaux ; ou encore les revêtements vont permettre de conférer des caractéristiques spécifiques telle la conductivité.

L'économie circulaire doit bien entendu être un vecteur d'innovations dans notre pays. Pour un thème d'aussi grande ampleur, une feuille de route partagée serait la bienvenue pour éviter des démarches isolées dans les régions. Décliné aux matériaux métalliques, il y a le recyclage (et les filières associées), la gestion des substances critiques, le développement de procédés innovants, des outils partagés d'évaluation (ACV)...

2-10 Des aides à la R&D matériaux incomplètes...

Christian DUMONT (Aubert & Duval), Nathalie BOZZOLO (MINES ParisTech CEMEF), Jean-Jacques MAILLARD, Hubert SCHAFF

Mots Clefs : Recherche, Développement, Maturité, Prototype, TRL

Les besoins en R&D des entreprises travaillant dans le domaine des matériaux se situent à 2 niveaux dans l'échelle TRL (**TRL = Technology Readiness Level, niveau de maturité de la technologie concernée** – Grille TRL jointe en annexe) :

- Des travaux correspondant au **TRL 1 à 3** permettant de développer des nouvelles compositions d'alliages, de mieux comprendre les procédés d'élaboration et de transformation qui y sont associés ou encore les conséquences des histoires thermomécaniques sur l'évolution des microstructures et des propriétés.
- En parallèle et avec un léger décalage dans le temps, il convient ensuite de réfléchir à l'**industrialisation des travaux précédents**, de façon à mettre au point les 1^{ers} prototypes à l'échelle 1 : **TRL 4 à 6**. Cette étape, qui consiste donc à passer de l'échelle du laboratoire à la fabrication industrielle est souvent longue et coûteuse. Elle est parfois appelée la « Vallée de la mort »...

Constat / Alerte :

Étape TRL 1 à 3

Cette étape implique classiquement des partenaires académiques dans le cadre de travaux de thèses. Elle correspond donc au mode de relation privilégié entre l'industrie et les laboratoires de Recherche. Ce mode de fonctionnement implique un pilotage subtil entre :

- Les besoins à court terme des industriels, pour répondre à des questions techniques spécifiques.
- La nécessité pour les académiques de présenter à leurs pairs des travaux avec une bonne tenue scientifique.

Cet équilibre est généralement bien respecté et les retours d'expérience sont positifs. Néanmoins, les coûts restent relativement élevés (coût d'une **thèse** : 80k€/an) et exercent un frein sur le développement de ces pratiques.

Le principe des **chaires d'entreprise**, avec plusieurs thèses concomitantes et/ou échelonnées dans le temps, constitue alors un plus considérable. Il garantit la continuité de l'action tout en créant des synergies entre les travaux et les laboratoires très profitables pour tout le monde. Les coûts demeurent là encore assez élevés (mise de fond pour la mise en place d'une chaire : 400 k€).

Les **chaires industrielles ANR** constituent un dispositif efficace qui permet de bénéficier d'un abondement de l'état à hauteur de 50%. La contribution industrielle minimale s'élève à 600 k€ sur 4 ans, provenant d'un ou plusieurs industriels. La chaire industrielle ANR DIGIMU par exemple est financée par un consortium de sept partenaires industriels, réduisant ainsi significativement l'effort de chacun.

L'aide financière de l'ANR est bien sûr la bienvenue, mais la procédure administrative est relativement lourde à mettre en place et peut décourager certaines équipes de recherche de taille réduite.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Par ailleurs, pour constituer la palette de compétences nécessaire pour répondre aux grands enjeux industriels, il est souvent nécessaire de **réunir les compétences de plusieurs équipes académiques**. Il n'existe pas de cadre qui permette de conduire un programme de recherche entre plusieurs partenaires industriels et plusieurs laboratoires avec une aide de l'état. Il existe pourtant des initiatives dans ce sens, comme le projet CONTINUUM qui réunit quatre industriels et trois laboratoires autour des alliages de titane, qui pourraient bénéficier d'un effet de levier avec un co-financement public.

Cette situation est d'autant plus dommageable quand nous la comparons à ce qui est mis en œuvre au Royaume Uni via l'EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) : **la procédure de financement pour une thèse est très simple et très souple, et son coût est environ 4 fois moins cher pour l'industriel concerné** : la mise en place de synergies en est alors largement facilitée que ce soit entre Laboratoires ou entre Industriels. Nous observons par ailleurs la constitution d'un réseau dense et interactif de laboratoires universitaires impliqués sur les mêmes sujets.

Étape TRL 4 à 6

Pour rapprocher les travaux académiques ou technologiques et la mise en œuvre de ces avancées dans l'industrie, des **Instituts de recherche technologiques (IRT)** ont été mis en place.

Toutefois, les investissements français dans les IRT demeurent sans commune mesure avec les efforts financiers du gouvernement britannique pour leur équivalent (réseau CATAPULT). Plusieurs de ces plateformes britanniques sont même de réels outils industriels.

Lorsque ces mises au point concernent des **alliages coûteux** (entre 80 et 100 k€ pour un lingot), il devient évident que les marges de manœuvre sont très limitées. Le plus souvent, nous devons nous contenter, faute de moyens financiers suffisants, **d'une solution non complètement optimisée**, ce qui constitue un **handicap considérable par rapport à la concurrence étrangère**. Ces derniers disposent des fonds ou des opportunités pour mettre en place des plans d'essais approfondis, mettant en jeu un nombre nettement plus conséquent de lingots au départ.

En conclusion, les aides R&D pour les phases finales de l'industrialisation des produits innovants sont faibles en France : les IRT ne couvrent pas tous les domaines technologiques et leur capacité de travail est trop limitée pour avancer suffisamment rapidement, et les fabrications expérimentales échelle 1, indispensables pour atteindre l'excellence du nouveau produit, ne sont pas financées.

Recommandation/ Proposition :

La France dispose d'acteurs industriels majeurs prêts à coopérer sur des sujets de recherche en amont des procédés et applications finales, d'un réseau de laboratoires d'excellence aux compétences complémentaires, et d'IRT capables de porter les résultats de la recherche à des niveaux plus proches de la finalisation du produit.

Il est donc souhaitable de **créer un dispositif qui permette de mettre en œuvre de grands projets de recherche couvrant des questions fondamentales, des aspects technologiques et préparant le transfert industriel vers les entreprises concernées, permettant ainsi le soutien de celles-ci**.

Ce dispositif devra être suffisamment souple pour permettre la participation de chercheurs aux **compétences complémentaires**, si besoin issus de **plusieurs établissements**, ainsi que le recours à des moyens multiples qu'ils soient disponibles dans les laboratoires de recherche, dans les IRT ou dans l'industrie.

Il devra, le cas échéant, permettre également le **financement de moyens complémentaires** qui ne seraient pas déjà disponibles.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Annexe : Les niveaux de TRL

