

Chapitre 6 : Les nouveaux matériaux. : une solution pour produire de l'énergie décarbonée

Table des matières

6-1 Introduction	2
6-2 Les matériaux pour les Nouvelles Technologies de l'Énergie dans un contexte d'Économie Circulaire	3
6-3 Vent d'innovation dans l'éolien	9
6-4 Matériaux et transition énergétique.....	13
6-5 Matériaux et procédés pour l'énergie nucléaire.....	18
6-6 Matériaux poreux pour l'énergie et l'environnement	26
6-7 Matériaux du futur : les Métamatériaux.....	27
6-8 Matériaux et Mobilité	28

6-1 Introduction

Danièle QUANTIN

Mots Clefs : Énergie

Les matériaux sont **clefs pour l'énergie en particulier décarbonée**, nucléaire, éolien, batteries, photovoltaïques...

Mais pour **une production sécurisée**, il faut **aussi** continuer à faire des recherches dans le **domaine de l'industrie nucléaire, de la pétrochimie et des piles à combustible**, domaines où les termes 'conditions complexes' prennent tout leur sens. Il faut effectivement y considérer des matériaux sous contraintes mécaniques et chimiques très fortes.

Dans un contexte de transition écologique voulue fortement par les citoyens, le **challenge du stockage de l'énergie** semble aussi un point crucial. Produire beaucoup d'énergie de façon propre et décarbonée est aujourd'hui à notre portée. Certains de ces moyens de production (si ce n'est tous) nécessitent par contre de stocker l'énergie produite par exemple via la **filière hydrogène et celle des batteries**. Ces deux technologies sont surtout envisagées dans les applications en mobilité où la puissance par kilo embarqué est le paramètre important et où l'aspect matériau (et sa durabilité) est une voie importante de progrès. Certaines autres applications du stockage, où **l'encombrement importe peu mais où c'est l'énergie totale emmagasinée qui compte sont sans doute aussi à explorer** (accumulateur red-ox, stockage par énergie potentielle mécanique ou hydraulique).

Au-delà de la production et du stockage, des problématiques spécifiques sont associées au démantèlement des équipements lourds, nucléaire mais aussi éolien dont le parc sera aussi à traiter assez rapidement (réparabilité, récupérabilité, recyclage, stockage des déchets).

Globalement, les enjeux sont :

- Développer les **synergies nucléaire/non nucléaire sur les procédés émergents**.
- Développer **la place pour les start-up** pour la synthèse et l'intégration des nanomatériaux en particulier.
- Renforcer une **approche d'éco-innovation** des composants pour les énergies.

6-2 Les matériaux pour les Nouvelles Technologies de l'Énergie dans un contexte d'Économie Circulaire

Étienne BOUYER – Frédéric SCHUSTER (CEA)

Mots Clefs : approche intégrée de l'énergie, synergie Nucléaire/NTE, efficacité matière, économie circulaire

Introduction

Dans un contexte de mix-énergétique et d'approche intégrée de l'énergie, la R&D sur les matériaux et procédés revêt un caractère stratégique. Certes, les échelles de temps de développement entre les matériaux du nucléaire et les matériaux pour les NTE sont très différentes, il n'en demeure pas moins, qu'il existe des synergies importantes à développer entre ces domaines. Le couplage entre les différentes sources de production d'énergie induit également une recherche spécifique sur les matériaux entrant dans la constitution des composants « aux interfaces » entre ces différentes sources.

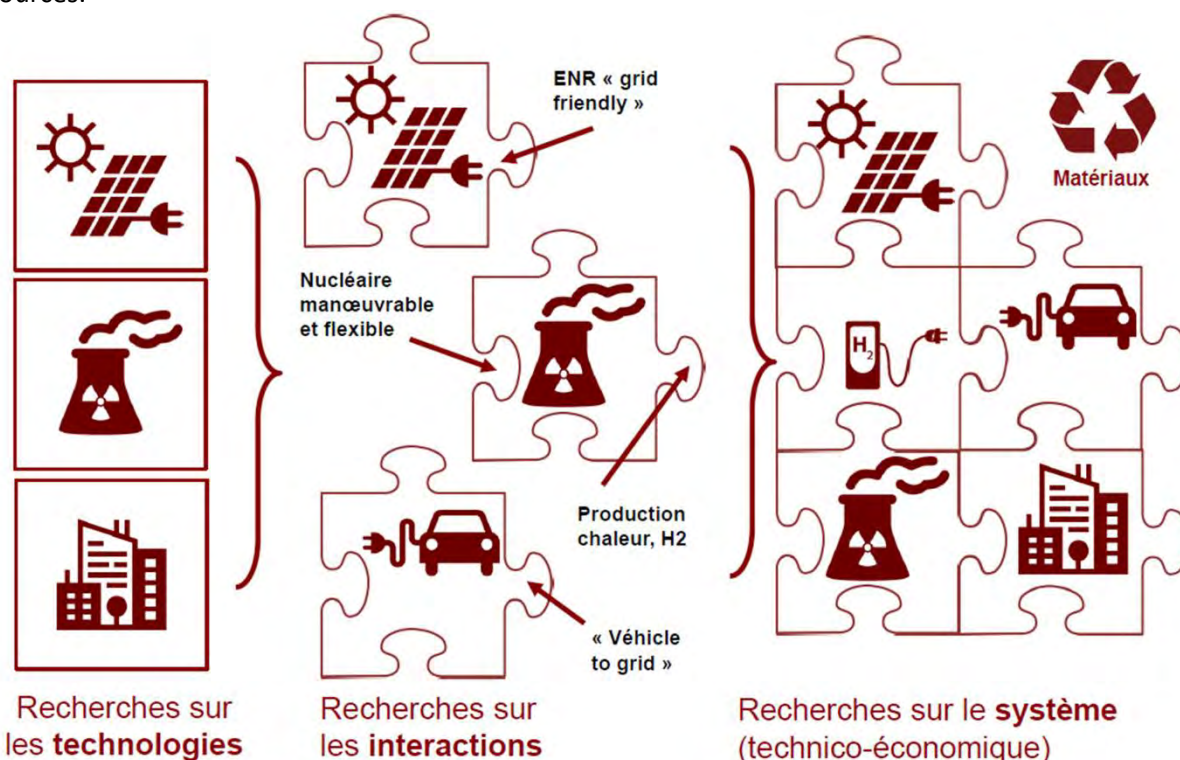


Figure 1 : Vision schématique de la recherche sur une approche intégrée de l'énergie au CEA

Dans le domaine de l'énergie nucléaire, les temps de développement des matériaux sont longs, les projets sont à long terme, il est nécessaire de développer une science prédictive pour prévoir le comportement des matériaux sur de longues périodes et sous irradiation. Dans le domaine des énergies renouvelables et des nouvelles technologies de l'énergie (NTE), le retour d'expérience est assez rapide, la concurrence entre les acteurs très importante, on recherche des procédés de production à bas coût, la place des nanomatériaux est très importante, ce qui conduit à la création de start-ups (ex Nawatechnologies sur les nanotubes de carbone pour supercondensateurs, Nanomakers pour la synthèse de nanopoudres cœur-coquille pour les électrodes de batteries...) et il faut gérer la problématique de la minimisation de l'utilisation des métaux stratégiques, de leur possible substitution ou de leur recyclage (ex platine des cœur de pile à combustible).

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Bien que les R&D sur les matériaux du nucléaire et sur ceux des NTE soit donc bien différentes, des synergies sont cependant possibles et même souhaitables, en particulier en ce qui concerne le développement des procédés de fabrication émergents, comme la fabrication additive ou plus généralement la métallurgie des poudres (Compaction Isostatique à Chaud, Spark Plasma Sintering, synthèse de poudres « à la demande »), les procédés innovants d'ingénierie des surfaces (PVD ionisés, CVD basse température, ALD, Cold Spray, projection plasma de suspensions de nanopoudres etc...) ou le développement de procédés qui permettent d'intégrer des traceurs et des capteurs directement dans les composants pour suivre leur durabilité (smart fonctionnalisation).

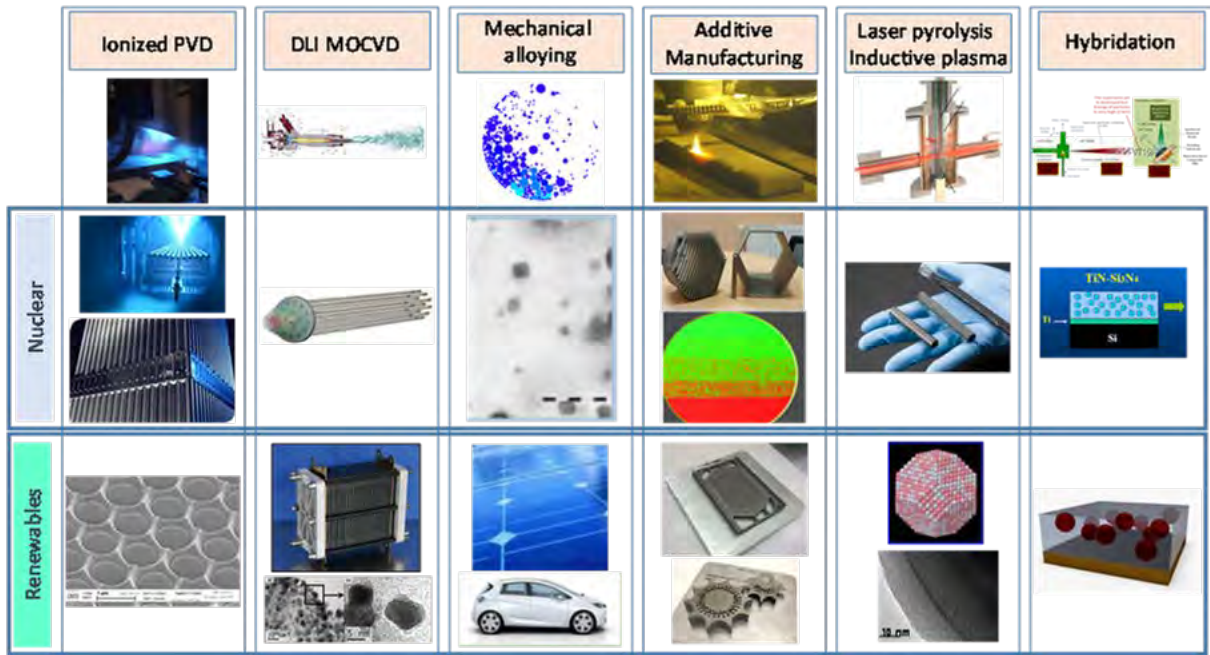


Figure 2 : Exemples illustrant les possibles synergies entre Nucléaire et NTE sur les procédés émergents

Matériaux et procédés pour les Nouvelles Technologies de l'Énergie

Production

Le photovoltaïque (PV) est l'une des sources renouvelables les plus en croissance pour la production d'électricité grâce à la réduction continue des coûts des cellules, modules et panneaux complets et aux politiques nationales encourageant le déploiement de solutions PV. La technologie PV actuelle dans le monde est principalement basée sur des cellules en silicium. Malgré un fort développement de la R&D sur les matériaux de type pérovskite, motivés par une efficacité potentielle plus élevée et un impact plus faible (GES) que les cellules à base de silicium pendant leur fabrication et leur traitement, les cellules de silicium ont un avenir solide au moins pour la prochaine décennie.

Pour illustrer les tendances du PV, la figure 3 montre un large éventail d'applications. Cela couvre de nombreuses façons d'appliquer le PV, du champ du PV conventionnel au PV intégré dans les bâtiments (toit et / ou façade) ou en mobilité (routes, voitures, avion, pseudo satellite).

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID



Figure 3 : Exemples d'applications du photovoltaïque

Les moyens de mettre en œuvre le «PV partout» sont multiples. Afin de réduire l'empreinte au sol, l'approche PV intégrée au bâtiment (BIPV) est encouragée. L'intégration dans le bâtiment ou dans des systèmes mobiles implique une forte réduction de poids. La réduction du poids implique une nouvelle conception où la réduction des quantités de matériaux est ciblée. Ce cercle vertueux pousse l'innovation vers la sobriété des matériaux pour diminuer l'épaisseur des différents matériaux nécessaires à la réalisation d'un panneau photovoltaïque. L'image montrée dans la figure 4 illustre une application militaire à l'étranger où le poids du panneau PV est réduit jusqu'à 4 kg / m² contre 12 kg / m² dans le domaine PV classique grâce à un effort global de conception.

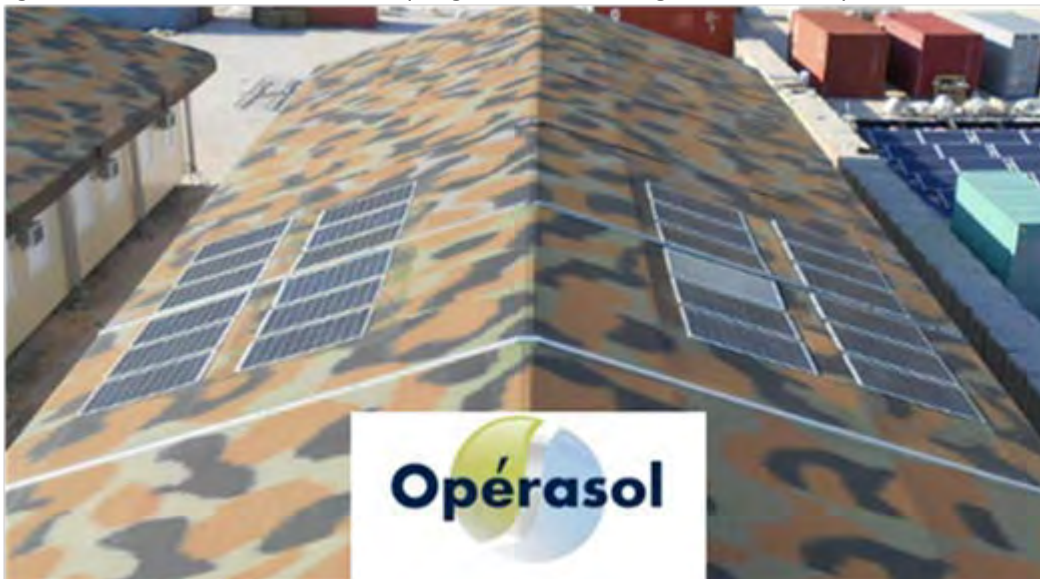


Figure 4 : Exemple de déploiement de PV dans le domaine militaire

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Stockage

Le domaine en plein essor de la batterie Li-ion est fortement porté par l'émergence de la mobilité électrique. Les problèmes liés aux matériaux stratégiques (CRM : Critical Raw Materials) sont importants pour le déploiement de la batterie dans le monde entier. Le cobalt, le nickel, le graphite et même le lithium sont des substances sur lesquelles tous les acteurs sont attentifs à leur chaîne d'approvisionnement. De nombreuses activités sont orientées vers une substitution du graphite dont l'essentiel de la production provient de Chine. En raison de sa capacité spécifique théorique élevée (3579 mAh / g), le silicium apparaît comme une alternative intéressante au graphite pour les applications à haute densité d'énergie dans les batteries Li-Ion. Cependant, en raison d'énormes changements de volume lors de la lithiation / délithiation, une décrépitation rapide se produit avec une perte de performance. Les matériaux Core Shell Si @ C (cœur-coquille) sont synthétisés (par exemple par pyrolyse laser dans une installation de pyrolyse laser à double étage permettant le contrôle de l'organisation du cœur Si (amorphe ou cristallin) ainsi que de l'épaisseur de la coque).

D'autres exemples pertinents sont actuellement en cours comme la réduction de la teneur en cobalt dans la cathode. La nouvelle génération de batterie Li-ion pénétrera progressivement le marché, les nouvelles chimies pour anode, cathode et électrolyte sont motivées par une réduction de la teneur en CRM, une réduction des coûts et une demande croissante pour des dispositifs de batteries plus sûrs (c'est le cas de batteries à l'état solide). La figure 5 montre les différentes technologies qui devraient pénétrer le marché des batteries dans les prochaines années.

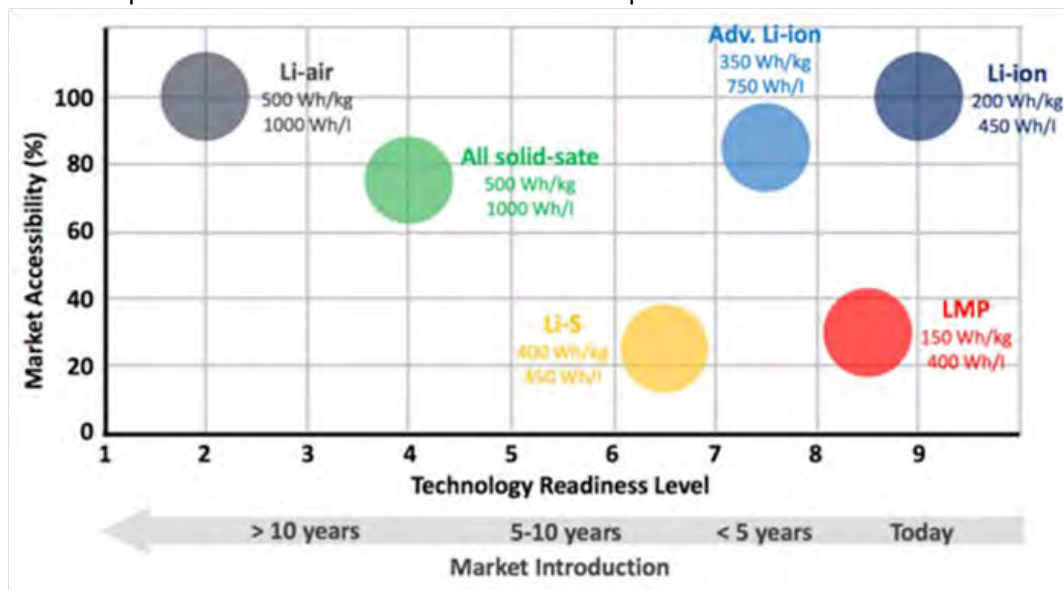


Figure 5 : Pénétration des différentes technologies de batteries

Conversion

La pile à combustible PEM est un dispositif qui convertit l'énergie chimique en électricité sans émission de CO₂, voir figure 6. Les réactions électrochimiques se produisant à l'anode et à la cathode nécessitent un catalyseur noble pour permettre une plage de températures de fonctionnement entre la température ambiante et 90 °C. L'un des principaux problèmes qui empêchent une plus grande pénétration d'une telle technologie est la teneur en métaux nobles. Plusieurs stratégies sont testées pour réduire le contenu PGM (Platinum Group Metal) ou les remplacer complètement.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

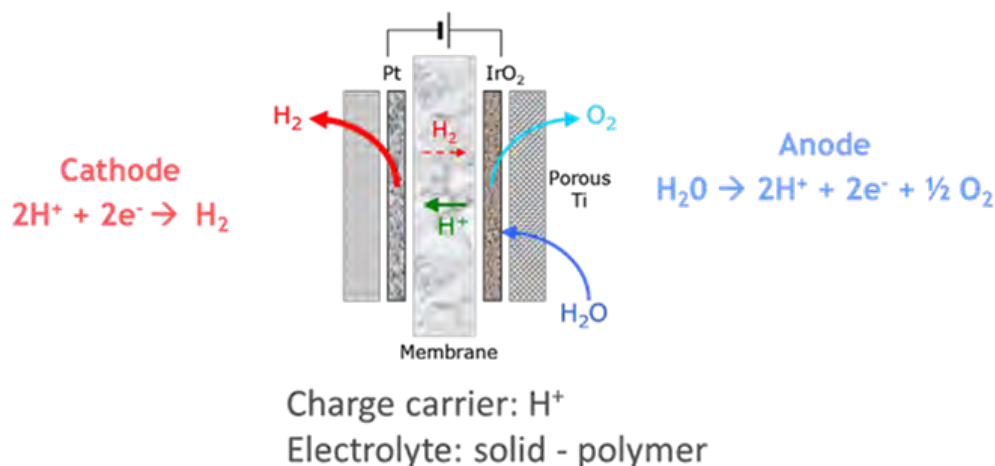


Figure 6 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

S'inspirant de la structure et de la fonction d'enzymes naturelles appelées hydrogénases, de nouveaux électrocatalyseurs pour la production d'hydrogène (HER) et l'oxydation (HOR) ont été conçus, entièrement caractérisés et modélisés grâce à des méthodes de chimie théorique. Ces catalyseurs moléculaires sont basés sur des éléments abondants sur Terre tels que le fer, le nickel, le molybdène et le cobalt. La combinaison de cette approche moléculaire bio inspirée avec des outils nanochimiques (en particulier des techniques de modification de surface covalente et non covalente) a permis de développer les premiers matériaux électrocatalytiques sans métaux nobles pour une oxydation / production réversible de H₂ dans des conditions compatibles avec les technologies PEM. Ces matériaux à base d'un complexe moléculaire Ni fixé sur des nanotubes de carbone ont en effet été testés en demi-cellule et se sont révélés actifs avec une très grande stabilité en fonctionnement.

Les matériaux carbonés dopés avec plusieurs hétéroéléments comme l'azote, ou le métal de transition comme le fer ou le cobalt, sont capables de catalyser la réduction de l'oxygène (ORR) en milieu acide avec une efficacité proche du catalyseur au platine. Le nano-carbone comme le graphène ou le nanotube ouvre la voie à une nouvelle ère pour ces catalyseurs, ils offrent une stabilité, une conductivité et une surface plus élevées par rapport au noir de carbone. De plus ces nouveaux matériaux offrent une grande polyvalence chimique qui permet d'utiliser plusieurs méthodes de greffage (covalente ou non covalente) ou de construire directement un site catalytique actif sur la surface du matériau. CEA/DRF/IRIG développe un catalyseur à base de graphène nanostructuré afin d'améliorer la diffusion de l'oxygène et des réactifs et d'augmenter la densité du site catalytique actif obtenu par dopage. De nouveaux précurseurs moléculaires à haute teneur en azote sont étudiés pour modéliser des catalyseurs de graphène fortement dopés à l'azote, et des approches bio inspirées sont également développées pour l'ORR.

L'intégration des nanomatériaux (ORR et HOR) dans une pile à combustible PEM fonctionnelle et entièrement sans métaux nobles a été réalisée. La mise en œuvre d'électrocatalyseurs abondants sur Terre dans les PEMFC doit être poursuivie afin d'augmenter la cyclabilité, la durabilité et la cinétique par rapport aux solutions PGM standard.

Transport

Le transport d'électricité implique d'énormes quantités de matériaux conducteurs, soit pour les infrastructures fixes (réseau de transport et de distribution) dans un pays, soit pour les applications de mobilité, en particulier la mobilité électrique. L'un des matériaux conducteurs les plus utilisés est à base de cuivre. Les ressources primaires sont là (et limitées) mais leur extraction devient plus difficile (gisement de moindre qualité) avec des conséquences environnementales qui pourraient

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

être localement importantes: en 1910, pour obtenir une tonne de cuivre (métal) il fallait extraire 55 tonnes de minerais alors que en 2010, 125 tonnes de minerais ont dû être extraites pour obtenir une tonne de cuivre.

Le plus gros avion commercial (Airbus A380) contient plus de 500 km de câbles électriques représentant environ 4 tonnes de matériaux, principalement des métaux comme le cuivre. Une nouvelle approche tente de remplacer le cuivre par des matériaux plus légers et abondants tout en maintenant ou même en améliorant les propriétés électriques.

Les nanotubes de carbone (CNT) sont de bons candidats car ils présentent une très bonne conductivité électrique, notamment sans influence sur la température et sur la fréquence, ce qui n'est pas le cas du cuivre. Les CNT sont des matériaux légers combinant de manière unique à la fois de bonnes propriétés électriques, thermiques et mécaniques. La question à laquelle il faut répondre est de savoir comment assembler à l'échelle macroscopique ces nanomatériaux tout en conservant leurs propriétés exceptionnelles. En combinant des techniques CVD (PACVD) pour faire pousser des tapis de CNT, puis de filage des tapis, il est possible de fabriquer des fils jusqu'à 15-20 μm de diamètre, voir figure 7.

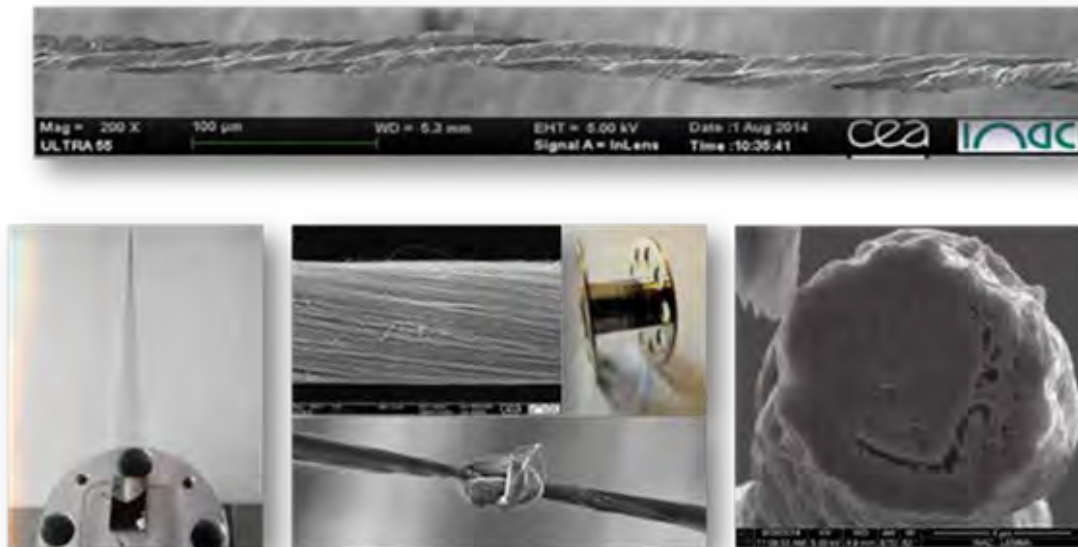


Figure 7 : Exemple de filage de CNTs pour la réalisation d'un câble

Certains problèmes doivent encore être résolus, comme la faible densité de fil (qui diminue la conductivité électrique) ou la limitation de la construction de câbles avec un diamètre plus élevé (en mm ou en cm). Une option intermédiaire serait de construire des matériaux conducteurs composites en mélangeant du CNT et du cuivre afin de réduire la quantité du dernier.

Enjeu N°1: développer les synergies nucléaire/non nucléaire sur les procédés émergents

Enjeu N°2: développer la place pour les start up pour la synthèse et l'intégration des nanomatériaux en particulier

Alerte / Enjeu N°3: renforcer une approche d'éco-innovation des composants pour les énergies

6-3 Vent d'innovation dans l'éolien

Delphine GARNIER, Sakina SEGHIR- Pôle de Compétitivité MATERIALIA

Mots Clefs : mix-énergétique ; repowering ; reconditionnement, énergie renouvelable, énergie décarbonée

Constat / situation Post COVID



Parc éolien de Carnon-Malandaue (Marne)

Chiffres clefs (1) : + 8 400 éoliennes installées en France, un parc d'une puissance cumulée de 17,1 GW (30 juin 2020), l'électricité éolienne couvre 7,2% de la consommation en 2019, et apporte 200 millions d'euros de recettes fiscales.

Puissances installées (2) : Vestas (5 170 MW), Enercon (4 206 MW), Senvion (2 492 MW)

Exploitants (3) : 1^{er} ENGIE (2 584 MW), 2nd EDF (1 675 MW), Team (1 016 MW)

Emplois en France : 20 200 emplois, soit 31 % des bureaux d'études (expertises techniques, développeurs...), 23 % la fabrication de composants de fonderie (freins, brides, pièces mécaniques), 27% en ingénierie et construction (assemblage, génie électrique) et 19% pour l'exploitation et la maintenance

Contexte stratégique français : Le décret d'application publié le 23 avril 2020 par la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie) prévoit que la capacité de l'énergie éolienne augmente de **45% d'ici 3 ans**. Or, en 2019 et 2020 la capacité éolienne installée n'a pas atteint l'objectif à 2 000 MW par an afin d'atteindre l'objectif de 34 GW de capacité cumulée raccordée en 2028.

Durant la Covid, les opérations de maintenance ont été assurées en respectant les gestes barrières et la supervision des parcs a été réalisée à distance. Pour preuve, la production moyenne entre mars et mai 2020 a été de +3,5% plus élevée qu'en 2019. En plein cœur de la crise sanitaire, les énergies renouvelables ont contribué à jusqu'à 39% du mix électrique français, dont 24% provenaient de

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

l'éolien uniquement. La phase d'exploitation a été peu impactée et a démontré la résilience de la filière.

Concernant les projets en construction, ils ont été temporairement arrêtés en raison du confinement. Il est à noter que les délais de recours administratifs ont été prolongés jusqu'à la fin de l'été 2020 ; un impact à la baisse sera à craindre sur le volume de projets accordés en 2020 et 2021. La chaîne de valeur sera touchée par ce ralentissement d'activité et par le report de certaines commandes.

L'impact sur le développement est réel en raison du ralentissement des procédures administratives, et de la suspension des concertations publiques. Ainsi, cet impact se mesure en plusieurs mois sur le planning prévu par les développeurs et risque de rendre difficile le respect des objectifs fixés par la PPE.

Côté Matériaux, une éolienne de 2 MW constitue un modèle standard en France, elle représente **plus de 850 tonnes** et comporte :

- 256 t de fer et d'aciers de différents grades,
- 24 tonnes de composites,
- 42 tonnes de fonte,
- 1,7 tonnes de câbles (cuivreux)
- Plus les revêtements en peinture époxy.

Alerte / Enjeu N°1 : Reconditionnement, revente des composants

Les nouveaux objectifs de recyclage ou de réutilisation sont décrits dans l'arrêté du 30 juin 2020, ils sont très ambitieux :

- 85% (hors fondation) de recyclage / réutilisation de la masse totale de l'éolienne (1), et 35% de la masse du rotor. Notons qu'une éolienne de 2 MW contient globalement 89,7 % de métal.
- l'excavation totale des fondations est désormais obligatoire (sauf contre-indication environnementale)
- la formule de calcul des garanties financières d'exploitation (article 20, annexe I) évolue : ces garanties s'élèvent désormais à 50 000 € par éolienne de 2 MW ou moins, et à 50 000 € + 10 000 € par MW pour les éoliennes de puissance supérieure à 2 MW.

Recommandations/ Propositions : « Repowering » (reconditionnement / réutilisation des composants)

Les contextes environnementaux et les contraintes réglementaires montrent des disparités importantes en « repowering » ; ces éléments ont des conséquences économiques évidentes quant au choix d'extension de l'exploitation des parcs, ou concernant le renouvellement de ces derniers.

L'analyse du volume de pièces reconditionnées par les turbiniers et les gestionnaires de parcs est très confidentielle au point que nous ne pouvons pas avoir des statistiques cohérentes. Certains comme ERG, Nordex, Enertrag choisissent d'installer des centres de stockage de pièces reconditionnées, d'autres ont des accords avec leurs fournisseurs pour réaliser les reconditionnements (cas de General Electric). **Le reconditionnement de composants serait une filière économique à structurer pour le secteur éolien, les expertises locales et les cycles de formation sont présents sur le territoire français.**

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

À NOTER

La maintenance préventive coûte entre 3 et 5 €/MW, la maintenance corrective coûte elle entre 5 et 10 €/MWh (La Compagnie du Vent, 2019) (3).

L'ACV (Analyse du Cycle de Vie) est basé sur des taux de recyclabilité théorique des métaux, ce sont des hypothèses prises par chaque entreprise souhaitant faire leur ACV. L'«ACV» reste un outil et non un moyen.

L'absence de critère de durabilité dans la réglementation européenne, et dans les appels d'offres français ne favorise pas suffisamment des initiatives d'écoconstructions, et rend difficile également à la construction d'une filière de reconditionnement sur le territoire français et européen.

Le marché de la revente des composants est très peu dynamique, et attentiste (3). Le coût des démantèlements onshore est très variable. Trois facteurs majeurs lui sont associés : les cours des métaux (cuivre, acier...) sont instables, le recyclage des composites n'est pas mature.

Alerte / Enjeu N°2 : Nouveaux modèles business

Les exploitants ne bénéficient plus d'obligations d'achat auprès d'EDF depuis 2016. Les exploitants de parcs vendent l'électricité produite directement sur le marché de gros et au prix du marché. EDF OA verse ensuite à l'exploitant un complément de rémunération.

Ainsi, de nouveaux métiers sont apparus comme d'agrégateur, il est un administrateur de flexibilité intermédiaire entre les producteurs d'électricité (injectant leur électricité sur le réseau) et les fluctuations de consommation et le marché de gros de l'électricité.

Parallèlement, les exploitants d'installations d'énergies renouvelables concluent des Power Purchase Agreement (PPA) avec une entreprise consommatrice (« Corporate PPA »), soit avec un négociant en électricité (« Merchant PPA »). Le prix garanti de l'électricité inspire plus de confiance aux gestionnaires de parcs, mais aussi aux partenaires financiers en termes de rentabilité des installations.

À NOTER

Le prix moyen des projets sélectionnés pour l'éolien terrestre au dernier appel d'offres (avril 2020) est de 62,2 €/MWh. Une baisse tendancielle se dégage depuis la première période. L'éolien terrestre est compétitif face aux autres technologies de production d'énergie

Le prix moyen des projets sélectionnés pour l'éolien en mer ne cessent de baisser. Il était de 44 €/MW/h sur 20 ans au dernier appel d'offres remporté à Dunkerque (juin 2019).

Recommandations/ Propositions : filière stratégique du mix-énergétique

Les équipes se sont mobilisées plus que jamais afin d'assurer la sécurité et l'équilibre permanent du réseau électrique en 2020. Ce bon fonctionnement a été possible grâce au concours du régulateur, de tous les acteurs du secteur éolien (producteurs, gestionnaires de réseaux, fournisseurs), et au maintien des marchés de l'électricité.

La crise sanitaire a mis en exergue la nécessité de **développer un réseau encore plus résilient et flexible**, à savoir les « **infrastructures numériques** » : elles contribuent largement à ces deux objectifs en facilitant l'exploitation et la maintenance des réseaux au plus près des limites techniques.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Alerte / Enjeu N°3 : Optimisation de la performance

Des enjeux de performance dans l'exploitation et la maintenance des parcs éoliens se portent essentiellement sur les analyses de potentiel de vent, puis la gestion des énergies variables et prédictibles. On peut mettre en avant **quatre axes majeurs de recherche, d'innovation et de développement pour la profession éolienne** : elles concernent les **technologies de stockage multiservices complétés par les aspects de synchronisation, puis les projets relatifs à l'activation ponctuelle de flexibilités locales, la réduction des coûts en matières premières, et enfin la gestion de l'écrêtement de production.**

Recommandations/ Propositions : Management de la maintenance

Les stratégies de maintenance sont fondées sur une politique d'optimisation de fabrication d'électricité, et la performance des composants. On constate que les nouveaux modèles de business et techniques mettent en équation les performances des composants clefs (génératrice, rotor), l'anticipation des pannes et l'estimer leurs coûts de maintenance. Ce modèle est utilisé en particulier pour les parcs sortis de contrats de rachat d'électricité.

La filière éolienne continue à répondre à ces enjeux clés sur ces 3 grands axes : intégration dans son environnement, optimisation de la production et de la performance. Cette filière continue à s'appuyer de l'innovation et de la R&D pour renforcer sa compétitivité comme par exemple la digitalisation pour augmenter l'efficacité de production/performance ou encore la robotique, améliorations continues du design avec de nouveaux matériaux, la maintenance prédictive...

Références

- (1) Source FEE (France Energie Eolienne), 31 12 2019
- (2) Source Etude Capgemini, 31 12 2019
- (3) Source AD3R, 21 10 2019

6-4 Matériaux et transition énergétique

Jean François PIERSON – Institut Jean Lamour / Laboratoire CP2S
et François MONTAIGNE pour le Projet MiNaMat*

*Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (IPCMS), Institut de Science des Matériaux de Mulhouse (IS2M), Institut Jean Lamour (IJL)

Mots Clefs : Énergie, Hydrogène, nanomatériaux, électrolyse

Constat Post COVID sur le thème

La cible Française du Zéro Carbone en 2050 (neutralité Carbone) c'est-à-dire un montant d'émission égal au montant de l'absorption du CO² émis est un challenge ambitieux et difficile qui nécessite de nombreux projets dits de « **Décarbonation** ».

L'**hydrogène-énergie** fait partie des solutions potentielles et sa fabrication fait l'objet de projets nombreux à des niveaux de TRL variés allant jusqu'aux équipements de production industriels, de l'exploitation de la biomasse à l'électrolyse (avec de l'électricité verte) sans compter les aspects stockage et transport de cette petite molécule qui diffuse facilement.

Une autre problématique est globalement celle du **stockage de l'énergie** (énergies renouvelables) et particulier sous forme électrochimique.

De **nouveaux matériaux** sont nécessaires pour accompagner ces challenges et un projet emblématique MiNaMat « Micro et Nano Matériaux vers une meilleure efficacité énergétique » a été lancé.

Alerte / Enjeu N°1: Production d'hydrogène décarboné : développement de photo(électro)catalyseurs pour la photolyse de l'eau

Dans la perspective du développement durable et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'hydrogène apparaît comme un maillon essentiel de la transition énergétique à condition d'avoir une production décarbonée (moins de 5% actuellement). Il s'agit d'un vecteur énergétique très versatile qui peut permettre de stocker massivement les énergies renouvelables intermittentes. Les applications de l'hydrogène « vert » sont multiples et vont de la substitution de l'hydrogène issu du gaz naturel dans le secteur industriel jusqu'au transport, y compris lourd (bus, trains, camions). Il est donc nécessaire d'accroître radicalement sa production mais également de diversifier les sources d'approvisionnement. Parmi les voies possibles de production de H₂ décarboné (valorisation de la biomasse, électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables, bio-production, etc.), la décomposition photo(électro)catalytique de l'eau est une des solutions les plus prometteuses, à la fois en termes de coût et d'impact environnemental. Ce procédé utilise un photocatalyseur dispersé ou immobilisé sur un support. L'irradiation du catalyseur immergé dans une solution aqueuse permet la génération d'H₂ de grande pureté en utilisant l'énergie solaire. Néanmoins, en raison de la complexité des mécanismes mis en jeu lors de la réaction (absorption de la lumière, transport de charges, catalyse des réactions...), il est difficile de trouver des matériaux répondant à l'ensemble des critères requis. Le principal enjeu consiste à développer des catalyseurs dont les rendements de conversion de l'énergie solaire pour la production d'H₂ sont supérieurs à 10% avec des matériaux constitués d'éléments abondants, bon marchés et peu toxiques. Différentes stratégies sont à l'étude pour augmenter les rendements de conversion des matériaux photocatalytiques parmi lesquelles on peut citer le dopage anionique et/ou cationique, la nanostructuration, la fonctionnalisation de surface ou encore le développement de matériaux hétérostructurés.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Alerte / Enjeu N°2: De nouvelles solutions de stockage électrochimique de l'énergie

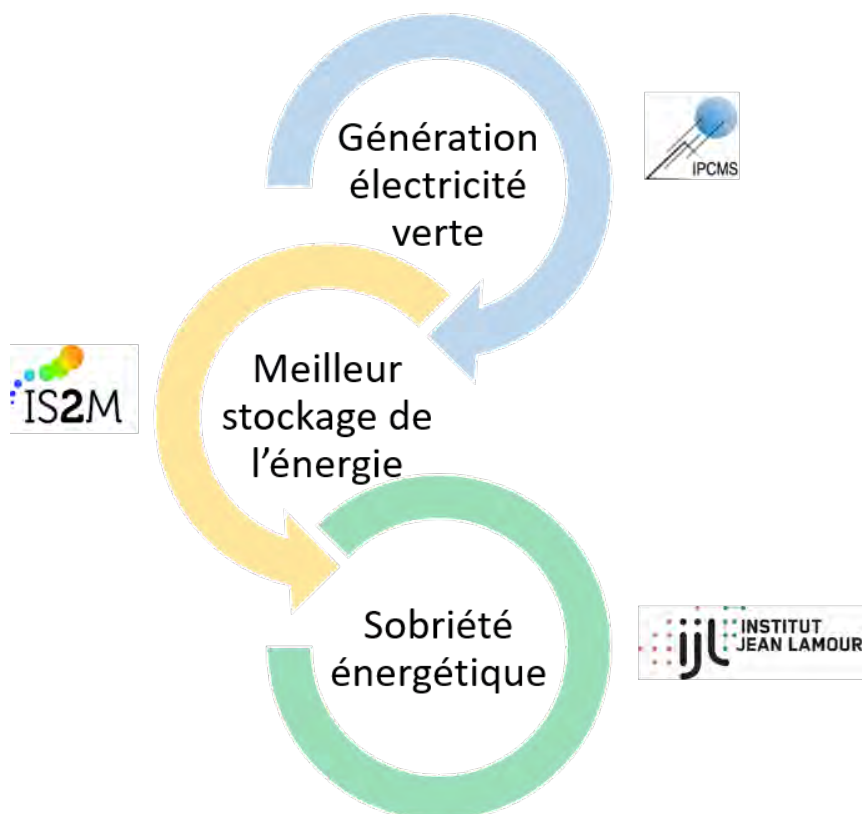
La réduction de la consommation d'énergies fossiles ainsi que la production d'énergies renouvelables sont des objectifs incontournables de la transition énergétique. Le développement d'une énergie sûre, durable et compétitive est primordial. La diversification des sources énergies pour parer à l'épuisement des ressources fossiles est devenue un défi scientifique et technologique majeur. De nombreuses sources d'énergies renouvelables sont utilisées pour la production d'électricité parmi lesquelles l'énergie solaire ou l'énergie éolienne qui apparaissent comme des alternatives pertinentes à l'énergie d'origine nucléaire. Cependant, l'intermittence de leur production d'électricité nécessite la mise en place de systèmes de stockage et de conversion énergétique pour assurer le lissage énergétique et une certaine indépendance. Parmi les différents systèmes de stockage de l'énergie, la batterie Li-ion est une des technologies les plus compétitives, puisqu'elle présente une densité d'énergie élevée, un très bon rendement et une longue durée de vie. Très utilisées pour des applications mobiles, elles possèdent également tous les prérequis pour le stockage stationnaire ; cependant la demande en lithium est en constante augmentation et des alternatives à l'utilisation de ce métal doivent être recherchées. Les batteries Na-ion par exemple, même si elles présentent des densités d'énergie inférieures, représentent une technologie en parfaite adéquation avec les concepts du développement durable, le sodium étant nettement moins cher et plus accessible pour l'Europe que le lithium. Elles pourraient constituer une alternative aux accumulateurs Li-ion, en particulier pour le stockage stationnaire de l'énergie intermittente. L'avenir de ce type de dispositifs repose sur les matériaux bien sûr, mais également sur les électrolytes et les nombreuses interfaces présentes en leur sein. Le développement de capteurs, placés à des endroits stratégiques, sera également un enjeu majeur pour l'augmentation de la durée de vie de ces batteries, et pourra générer des phénomènes d'autoréparation.

Alerte / Enjeu N°3: De nouveaux micro et nano matériaux pour une meilleure efficacité énergétique

Le Projet MiNaMat ciblé sur le développement de nouveaux micro et nano matériaux pour une meilleure efficacité énergétique a démarré par la mise en place de trois plateaux techniques interconnectés de tout premier plan : élaboration, caractérisation et micro et nanostructuration des matériaux.

Le travail de recherche sera développé conjointement par trois instituts. Ce projet repose sur l'excellence et la complémentarité scientifiques des partenaires matérialisé par de nombreux projets ainsi que la longue histoire de projets communs et de multiples collaborations fructueuses. Pour exemple les équipes de l'IPCMS et de l'IJL viennent de publier dans la revue *Communications Physics* leur étude sur un dispositif expérimental de spintronique permettant de récupérer de l'énergie à partir des fluctuations de la température ambiante. L'IPCMS et l'IS2M ont également développé récemment, dans deux articles successifs publiés dans la revue *Advanced Materials*, un nouveau concept de composant de spintronique et de nanoélectronique à électron unique pour les technologies de l'information post-CMOS à consommation ultra-faible, puisqu'étant capable de n'utiliser que la fraction de courant minimum théorique à savoir un seul électron. Cet axe de recherche pourrait s'avérer révolutionnaire pour la génération d'électricité propre, il sera largement développé dans le projet MiNaMaT. Les trois instituts travaillent ensemble depuis plus de 30 ans.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID



Nouvelles Micro- et Nano-technologies pour une électricité verte abondante

Afin de garantir notre sécurité énergétique dans un monde marqué par le dérèglement climatique, les énergies renouvelables doivent se substituer aux énergies fossiles. Cependant, toutes les stratégies de récolte d'énergie présentent des limites : i) Les sources naturelles atteignent des densités de puissance $P_d \approx 100 \text{ mW/cm}^2$ (solaire) mais n'opèrent pas 24/7 ; ii) les sources artificielles (RF, gradients thermiques...) lorsqu'elles sont présentes, sont autonomes mais limitées (P_d 10^2 - 10^8 fois plus faible).

L'IPCMS et l'IJL développeront en particulier dans ce projet une nouvelle approche permettant de transformer la chaleur ambiante en électricité. Résumée sur le site web www.spinengine.tech et médiatisée par le [CNRS](http://www.cnrs.fr) et l'[U. de Strasbourg](http://www.unistra.fr), cette approche combine des concepts de spintronique et de physique quantique. Développer cette technologie permettrait une P_d bien supérieure à l'irradiation solaire sur Terre.

L'IJL utilisera le plateau Elab implanté sur le TUBE DAUM pour fabriquer des hétérostructures à base de MgO un espaceur post-CMOS couramment utilisé en spintronique à l'échelle industrielle. L'IPCMS utilisera son cluster 'Hybride' pour fabriquer des hétérostructures à base d'espaceurs moléculaires. L'IPCMS mettra en place une chaîne technologique permettant de façonner ces hétérostructures post-CMOS en dispositifs de récolte thermique sous forme de nano-piliers verticaux. Cette chaîne aura pour particularité d'avant-garde de ne pas exposer la couche active aux résines, solvants et eau habituellement utilisés. Ceci permet l'intégration de matériaux fonctionnels post-CMOS (ex : molécules dotées de centres paramagnétiques nécessaires pour le récolteur).

Meilleur stockage de l'énergie

Nano-matériaux pour le stockage d'énergie : L'IS2M a une expertise importante (réseau RS2E) dans le domaine du stockage d'énergie avec notamment les batteries électrochimiques Li-Na-K-ion ou les supercondensateurs réalisées à partir de matériaux carbonés hybrides à propriétés contrôlées.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

L'institut a été impliqué dans la mise au point du premier prototype de batterie Na-ion (communiqués de presse CNRS) :

<https://lejournel.cnrs.fr/articles/batterie-sodium-ion-une-revolution-en-marche>

<http://archives.cnrs.fr/inc/article/vix2>

Les études portent sur la compréhension des mécanismes d'intercalation et leur optimisation à la fois pour améliorer les capacités de stockage mais également dans les procédés de fabrication de nouveaux matériaux à propriétés contrôlés avec la mise en œuvre de méthodes de synthèse originale et respectueuse de l'environnement (précurseurs « verts », solvants aqueux et faibles consommations d'énergie).

Une autre forme de stockage d'énergie est également étudiée à l'IS2M. Il s'agit du stockage d'énergie d'origine mécanique qui est convertie en énergie interfaciale au cours de l'intrusion d'un liquide non-mouillant (eau ou solution aqueuse d'électrolytes) dans un matériau microporeux hydrophobe, permise lors de l'application d'une force mécanique. Les recherches dans ce domaine s'orientent vers l'utilisation de nouveaux matériaux poreux et notamment les Metal-Organic Frameworks (MOFs).

Dans le cadre de ce projet, les mécanismes de charge/décharges (intrusion/extrusion) seront étudiés *in operando* dans des cellules en phases hétérogènes liquide/solide. Les travaux viseront à l'élaboration d'autres formes d'anodes de batteries (micro/nano structuration par voie de photochimique, synthèse et fonctionnalisation de matériaux poreux) dans une recherche de miniaturisation et à l'étude et l'utilisation à l'échelle mésoscopique de ces matériaux avec l'utilisation de la station de nanoprobng (NanoteraHertz) sous MEB ou microscopie optique et en cellule liquide AFM. Nous nous intéresserons plus spécifiquement aux supercondensateurs où le cycle de charge ne nécessite pas de réaction chimique (oxydo-réduction) comme dans le cas des batteries mais une migration par action d'un champ électrique, des ions dans le matériau poreux. Les voies possibles de charges couplant ces deux a

Sobriété énergétique : Nano-Matériaux pour le stockage de l'information

Les données numériques générées annuellement à travers le monde se comptent désormais en zettaoctets, soit en milliers de milliards de milliards d'octets. La croissance est si forte que les deux dernières années ont produit à elles seules 90 % des données mondiales. Les recherches de l'IDC (International Data Corporation) montrent que la quantité de données engendrées à l'échelle mondiale continuera à doubler tous les deux ans et atteindra 163 zettaoctets d'ici 2025, soit environ dix fois la quantité de données produites en 2017. Dès lors, l'explosion de la production de données, nécessitant des moyens de stockage et d'analyse de plus en plus importants et, par conséquent, une utilisation croissante de matériaux, pour certains rares, et toujours davantage d'énergie, pose un réel problème en matière d'impact environnemental.

Dans le cadre de ce projet nous allons étudier l'action combiner de pulse ultra-court de lumière ou de courant permettant de retourner l'aimantation et donc de stocker l'information en améliorant l'efficacité énergétique

Dans ce domaine du stockage de haute densité et à faible coût énergétique, la recherche s'est emparée des matériaux 2D d'épaisseur ultime (une couche atomique) comme le graphène associé à d'autres matériaux 2D ou 0D (point quantiques) dans des hétéro-structures dites van der Waals (vdWs). Contrairement à la réalisation d'empilements de couches par croissance de type top-down (3D-2D), l'utilisation des matériaux 2D en structures van der Waals résout les problèmes de contrôle des interfaces qui deviennent prédominantes quand les tailles des dispositifs sont fortement réduites notamment en spintronique. La possibilité de mixer différents types de matériaux 2D, conducteurs,

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

semi-conducteurs, isolant (nitrure de bore hexagonal...) et plus récemment 2D magnétiques, ouvre des perspectives de recherche et d'application inattendues. Un axe de recherche entre l'IPCMS et l'IS2M formalisé par l'ANR MIXES (plusieurs articles en commun) consiste à la réalisation et l'étude de nouveaux dispositifs quantiques (jonction tunnel 0D-2D, filtres de spin 2D) mettant également en jeu le spin de l'électron. Ces dispositifs à blocage de Coulomb ou plus récemment magnéto-coulomb sont réalisables sur différents types de matériaux 2D et seront intégrés dans des structures van der Waals plus complexes avec notamment des 2D magnétiques. L'IPCMS est un expert reconnu dans l'étude de nanocomposants post-CMOS à base de matériaux 2D, avec déjà plusieurs démonstrateurs novateurs de filtre de spin pour l'électronique de spin, de mémoire à un électron, ou de photodétecteurs pour le photovoltaïque. L'IS2M étudie depuis quelques années la façon de fonctionnaliser le graphène par différentes méthodes notamment l'intercalation de métaux et plus récemment les lanthanides pour leurs propriétés magnétiques pour certains, la possibilité de doper très fortement en électrons le graphène et leur aptitude à s'intercaler très facilement sans utiliser de défauts structuraux. Dans le cadre de ce projet, nous optimiserons les conditions d'intercalation pour stabiliser des couches magnétiques 2D entre deux couches de graphène ou dichalcogénure dans une hétérostructure van der Waals. Les propriétés de transport, magnéto-transport seront alors étudiées dans les conditions optimales offertes par notre projet MiNaMat.

Vers une sobriété énergétique dans la synthèse, l'utilisation et le recyclage de matériaux polymères

L'optimisation des coûts en énergie et plus globalement du cycle-synthèse-utilisation-recyclage des polymères (plus généralement les plastiques), devient un enjeu fondamental pour notre planète. L'IS2M s'intéresse très activement à ces questions notamment dans la synthèse de nouveau matériaux polymères, organiques-inorganiques hybrides, par la revalorisation de matériaux et l'invention/l'utilisation de nouveaux concepts ou l'efficacité énergétique peut-être intégrée comme une fonctionnalité dans la structure même du matériau. C'est le cas d'une approche innovante pour laquelle l'IS2M est précurseur, la NIR-LHC (Near-Infra-Red-Light to Heat Conversion), approche qui consiste à intégrer dans des photo-polymères des molécules, flocons de graphène fonctionnalisés, ou nano-structures organiques-inorganiques, qui ont la propriété de dégager une grande quantité de chaleur, localement (la température de près de 325°C a pu être atteinte avec certains composés) sous irradiation proche IR (donc à faible coût énergétique). Cette fonctionnalité peut être utilisée comme photo-amorceurs pour polymériser les matériaux mais également pour les dégrader (de-polymériser) et permettre leur recyclage à moindre coût. Il a été calculé que, comparé aux méthodes classiques utilisées dans le cycle de vie d'un polymère, ces nouvelles approches pourraient réduire le coût énergétique de près de 80%. Dans le cadre de MiNaMat, nous allons étudier à l'échelle nano, les mécanismes mis en jeu dans cette conversion énergétiques en adaptant ces systèmes à la station de nanoprobings sous MEB et les technique AFM dérivées. Les potentialités de cette approche en termes de réalisation de nano-dispositifs seront exploitées grâce à MiNaMat.

6-5 Matériaux et procédés pour l'énergie nucléaire

Emmanuel Herms (CEA + SFEN/Section Technique 2)

Jean Dhers (Framatome)

Mots Clefs : Energie, nucléaire, vieillissement, réacteurs avancés, fabrication avancée, Fukushima, recyclage

CONTEXTE GÉNÉRAL CONCERNANT LES MATÉRIAUX POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Le nucléaire n'a pas été impacté significativement par le COVID car la fourniture d'électricité est une exigence permanente. Cependant il y a eu deux conséquences, la baisse de cette consommation d'électricité et le report de maintenance de réacteurs. Les enjeux actuels concernent ainsi principalement :

- La maîtrise du vieillissement du parc
- L'accroissement de la sûreté
- La capacité à faire évoluer les concepts pour les réacteurs des générations futures

La maîtrise du vieillissement du parc

L'âge moyen des réacteurs est de 35 ans environ avec une limite de conception originellement fixée à 40 ans mais qui pourrait, en pratique atteindre 60 ans. Cela va nécessiter des investissements (le grand carénage), et des démonstrations auprès des autorités de sûreté.

Le vieillissement des composants en milieu circuit primaire du nucléaire est un enjeu majeur de la prolongation de nos réacteurs, et un enjeu financier important. Cela demande la maîtrise des mécanismes de vieillissement et leur simulation pour pouvoir mieux les prédire. Ce vieillissement est à la fois thermique et sous irradiation, et concerne aussi bien les aciers que les polymères des câbles. D'autres aspects potentiels concernent la régénération des structures vieilles par traitement thermique ou la recherche de nouvelles nuances vis-à-vis des problématiques de corrosion sous contrainte.

L'accroissement de la sûreté

Dans le contexte de l'accroissement de la sûreté lié au Post Fukushima, un enjeu important porte sur la résistance de la gaine du combustible qui, en cas d'accident grave réagit avec la vapeur d'eau et produit des quantités élevées d'hydrogène. L'amélioration de la tenue de cette gaine vis-à-vis de la vapeur d'eau génère une compétition mondiale. Il y a des solutions court terme qui apparaissent (revêtement de Cr) et il faut travailler sur des solutions plus fiables à moyen et long terme (céramique, HEA...).

La capacité à faire évoluer les concepts pour les réacteurs des générations futures

Les réacteurs avancés ne sont pas prévus avant 2030 pour les SMR et 2050 pour les réacteurs de Génération IV.

Les petits réacteurs modulaires (Small modular Reactors-SMR) sont des réacteurs à Eau Pressurisée (Pressurized water reactors- PWR) avec cependant quelques innovations, soit dans les composants eux-mêmes (échangeur de chaleur), soit dans les techniques de fabrication (compaction isostatique à chaud, Diode Laser, soudage Electron Beam...).

Les réacteurs de génération IV sont des réacteurs qui peuvent fonctionner à haute température (500°C ou plus), dans des milieux corrosifs divers (métal liquide, sels fondus). Il y a là tout un

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

boulevard de R&D une fois le type de réacteur choisi (tenue mécanique à haute température, corrosion, effet de l'irradiation...). Framatome est impliqué dans les réacteurs au sodium, les réacteurs haute température et les réacteurs à sels fondus. Il est indéniable que les études de génération IV ont contribué à mieux connaître la tenue à la corrosion et à la haute température de plusieurs alliages métalliques, notamment dans les options « métal liquide » (plomb, sodium) et surtout dans l'option « sels fondus »; les études des circuits ou gaines combustibles d'Astrid ont permis de comparer entre elles diverses nuances d'aciers austénitiques et martensitiques. La caractérisation (mécanique, microstructurale) des équipements de réacteurs à l'arrêt (comme Phenix) a aussi été envisagée: Ces travaux ont donc permis des avancées en matière de méthodes et de données, mais pas de décision de construire en France à court terme en relation avec l'évolution de la démarche générale relative à la génération 4. Une démarche de collaboration est engagée depuis de nombreuses années entre les acteurs Français et internationaux sur la conception de systèmes de Génération 4. Le GIF (Gen4 International Forum) reflète ces échanges.

Même si le nucléaire est très conservateur dans le choix de ses matériaux, des besoins d'étude mais aussi de nouveaux matériaux sont apparus pour répondre aux défis du vieillissement, de l'accroissement de la sûreté, et des réacteurs avancés. Néanmoins, pour que ces nouveaux matériaux soient homologués par des codes tels que ceux gérés par l'AFCEN (notamment RCC-M et RSE-M), il faudra prendre en compte l'instruction usuelle nécessaire à la codification qui devrait, dans l'idéal, être accélérée. L'exemple récent du cas de l'inconel 617 dans l'ASME montre que cette évolution est en cours.

PERSPECTIVES D'INNOVATIONS DANS LE DOMAINE DE LA SCIENCE ET DE L'INGÉNIERIE DES MATÉRIAUX POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Plus encore que pour le cas de beaucoup d'autres industries, le choix des matériaux dans l'industrie nucléaire est fortement influencé par les processus inhérents à la **qualification réglementaire**. L'accent particulier nécessairement mis sur l'évaluation de la **sûreté des composants** a complexifié l'adoption des nouveaux procédés de fabrication qui devaient ainsi avant leur déclinaison dans le secteur nucléaire voir finalisé tout le processus réglementaire de qualification et de normalisation propre à la filière.

Néanmoins, l'évolution conjointe de ces nouveaux procédés en regard de celle du tissu industriel hexagonal et des contraintes propres à la maintenance et à l'approvisionnement permettent d'envisager plusieurs avantages significatifs à l'adoption de certains des **nouveaux procédés de fabrication émergents**, tels par exemple que :

- **Prototypage rapide** et raccourcissement du délai d'approvisionnement pour des pièces standardisées
- **Re-engineering de composants** ou de parties de composants dont la filière d'approvisionnement s'avère obsolète et donc alternative en tant que stratégie de maintenance
- **Reconception de certains composants** au-delà des standards usuels des moyens de fabrication traditionnels et donc accès à des fonctionnalités améliorées
- Alternative technico-économique aux modes de fabrication existants
- Enfin, comme dans le cas d'autres industries, les nouveaux procédés peuvent dans certaines situations contribuer à promouvoir la résilience de la chaîne d'approvisionnement

Les **procédés de fabrication additive** sont directement pourvoyeurs d'une alternative potentielle lorsque l'exploitant fait face aux trois premiers besoins, les procédés de CIC peuvent s'ajouter à ces derniers dans le quatrième cas.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Une spécificité des procédés de fabrication additive est que ces derniers peuvent aussi offrir une stratégie directe de réparation accessible à l'échelle du site d'exploitation concerné et donc une alternative concrète à la démarche de maintenance.

Enfin, les **procédés d'application de revêtements** connaissent une évolution très rapide et voient leur domaine d'application potentiel s'élargir en lien avec la reconception de certains composants de réacteurs dans le cadre d'une approche systématique fonctionnelle de ces composants.

On peut citer les **exemples de prospects qui suivent dans le cas des réacteurs nucléaires électrogènes, des réacteurs expérimentaux et grandes infrastructures expérimentales intéressant les activités nucléaires** (fusion) :

- Dans le cas des réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération, les concepteurs se sont trouvés face à certaines impossibilités de conception pour des composants d'internes de cuve pour lesquels les tolérances et procédés de fabrication usuels n'étaient pas compatibles avec les exigences fonctionnelles envisagées [1]. En pratique les procédés de fabrication additive se sont avérées des recours potentiels dans ce type de cas : dans le cas de la préconception de réacteurs de 4^{ème} génération par exemple, des études de faisabilité ont montré que le procédé de fusion sur lit de poudre était susceptible de constituer une option réaliste de fabrication pour des pièces très complexes très difficilement réalisables par les procédés classiques sauf au prix d'une dégradation des exigences fonctionnelles prescrites. Les mêmes procédés ont été envisagés pour des composants hors-cœur suffisamment complexes tels que les échangeurs sodium/gaz [2]. Plusieurs interrogations initiales concernant les matériaux obtenus par voie additive étaient liées à leur performance en termes de durabilité, le niveau de leurs propriétés mécaniques en comparaison avec les matériaux forgés et leur tenue sous irradiation pour les composants « in-core ». La qualité des microstructures obtenues, a minima sur les matériaux conventionnels tels que les alliages inoxydables austénitiques, s'est néanmoins fortement améliorée et les paramètres la conditionnant sont progressivement mieux connus. Les inquiétudes portant sur l'inhomogénéité métallurgique (effet de texture) et la tenue mécanique se lèvent ainsi progressivement [3] même si les exigences de reproductibilité et de durabilité impliqueront des progrès en termes de R&D pour confirmer ce bon comportement d'ensemble. Dans ce cadre, l'optimisation des procédés complexes tels que la fabrication additive fait d'ailleurs l'objet de nouvelles études sur l'apport de l'Intelligence Artificielle à la maîtrise de ces nouvelles technologies et en particulier du lien entre paramètres d'élaboration/microstructures/propriétés d'usage
- Dans le domaine des réacteurs nucléaires électrogènes, le cycle de réalisation de certains composants complexes peut être grandement facilité via l'utilisation des méthodes de fabrication additive ou de CIC. Les initiatives dans le domaine nucléaire identifiées à l'étranger dans cette perspective, montrent les mêmes tendances d'ensemble : la réalisation des composants supérieurs des générateurs de vapeur est par exemple un des cas d'intérêt en raison du caractère géométrique complexe de ces pièces. De premières investigations concernant la tenue des matériaux dans les conditions « in core » semblent encourageants y compris sous irradiation même si la validation formelle de ces aspects nécessitera un volant de R&D encore significatif [4, 5]. En pratique, la situation évolue rapidement et le premier composant « in core » a été placé en réacteur au sein d'un assemblage combustible en mai 2020 dans le réacteur PWR Byron 1 opéré par l'électricien Exelon aux États Unis. Concernant la technologie de compaction isostatique à chaud (CIC) et, à l'image de ce qui s'est passé pour les composants subsea dans le domaine pétrolier, cette méthodologie de fabrication pourrait constituer une alternative technico-économique réaliste aux composants moulés et plusieurs initiatives sont en cours en ce sens. En ce qui concerne les produits moulés, leur spécificité métallurgique (structure austéno-ferritique) implique de plus une sensibilité limitée au

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

vieillessement dans les conditions d'exposition au milieu réacteur ce qui renforce l'intérêt de l'accès à de nouvelles modalités de fabrication. Dans certaines situations spécifiques, le procédé SPS (Spark Plasma Sintering) pourrait aussi constituer un complément ou une alternative au procédé CIC.

- Pour des installations à caractère plus exploratoire visant à la démonstration de la fusion nucléaire, les procédés de CIC et de fabrication additive sont envisagés en vue de faire face à des défis en termes de conception et de réalisation de composants exposés à des conditions très sévères de service (température, irradiation) et aussi car ils constituent le seul moyen d'obtenir un schéma réaliste de fabrication pour des pièces multi-métalliques. Ces techniques sont ainsi envisagées pour la réalisation de certains constituants du divertor et de l'enceinte des futurs Tokamaks DEMO et ITER [6, 7, 8]. Les procédés de fabrication additive constituent aussi une alternative d'intérêt pour la réalisation de certains composants des Stellarators [9, 10]. Les difficultés de réalisation, en particulier des bobines hélicoïdales, qui sont dues au design très complexe des Stellarators ont, en effet, été reconnues dès l'origine comme un des obstacles principaux à leur développement. Le développement en cours de matériaux à gradients de composition permettra aussi, en particulier au service de ces conceptions très complexes, de faciliter le recours à des composants multi-matières tout en préservant les propriétés fonctionnelles exigées par les concepteurs.
- Enfin, le développement des revêtements offre de nombreuses alternatives permettant une approche d'évolution incrémentale pour les réacteurs électrogènes actuels et potentiellement les réacteurs des futures générations. Un cas emblématique est la réalisation de combustibles « tolérants aux accidents » via l'application de dépôts de chrome sur les alliages de zirconium [11]. Ce revêtement déposé via les techniques de PVD ionisé de type HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) vise à limiter au maximum les phases d'oxydation en phase vapeur de la gaine combustible envisagées dans un cycle accidentel hypothétique. Le transfert technologique de cette démarche est actuellement en cours avec de premières étapes de qualifications. Une étape complémentaire est en cours de développement visant à réaliser à plus long terme un revêtement interne de type CrCx sur les tubes de gainage combustible en vue d'augmenter leur résistance à l'oxydation à haute température même en cas de perte d'intégrité mécanique. Le développement et le paramétrage d'un procédé dédié de type DLI-MOCVD (Direct Liquid Injection Metal Organic Chemical Vapor Deposition) est en cours dans cet objectif et les premières étapes de faisabilité ont été franchies [12, 13]. Ce type de revêtement interne pourra aussi permettre d'envisager une gestion facilitée de l'Interaction Pastille Gaine dans les assemblages combustibles et donc optimiser le pilotage et à travers ce dernier la manœuvrabilité des réacteurs. L'évolution des dépôts durs (alternatives aux alliages de type stellite) et leur réparation est un autre exemple d'application des nouveaux procédés mais de nature plus évolutionnaire. Les nouveaux revêtements sont en cours d'évaluation vis-à-vis de l'optimisation de la démarche anticorrosion sur l'aval du cycle pour les matériaux constitutifs des usines de retraitement du combustible usé soumis à des conditions chimiques très sollicitantes. Dans cette perspective d'utilisation, les procédés HIPIMS ou Cold Spray sont très prometteurs. Les développements en cours sont très prometteurs puisqu'il est permis d'envisager pour ces dernières générations de revêtements des conceptions architecturées et fonctionnalisées adaptées au mieux aux conditions de service [14]. Enfin, l'évolution rapide des procédés rend nécessaire une approche intégrée pour la conception et le choix des revêtements : une démarche de capitalisation systématique des données issues des essais procédés combinées à la modélisation des étapes physico-chimiques mises en jeu lors de l'application est ainsi engagée [15]. L'utilisation des procédés de projection laser permet aussi de combiner un choix de revêtement avec certains des avantages de la fabrication additive. (Bien sûr, dans la définition des procédés, il faut distinguer selon qu'ils concernent des pièces fortement irradiées, des pièces subissant de fortes contraintes mécaniques, ou des pièces

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

modérément irradiées ; les techniques de grenailage laser et de passivation chimique peuvent aussi contribuer à une meilleure tenue des matériaux, même si elles ne sont pas franchement innovantes).

- Les nouveaux matériaux (dont les matériaux dits « haute entropie ») pourront, à terme, bénéficier de ce type de démarche, en particulier la synthèse par approche combinatoire (évaluation systématique d'une série de nuances d'alliages sur la base de démarches de modélisation numérique et expérimentales à haut débit couplées). Enfin, l'ensemble de ces développements sont également conduits avec une approche visant l'Economie Circulaire dans laquelle on essaie de privilégier la substitution de métaux stratégiques par des solutions architecturées à base de matériaux plus abondants.
- Le procédé de fabrication additive de type arc-fil (ou WAAM) est, par ailleurs, susceptible d'offrir à terme une alternative pour la fabrication de gros composants comme le montrent les premiers développements [16]. Ce procédé est ainsi déjà envisagé dans le cadre de la réalisation de certains projets de SMR à l'international [17].
- Il est, enfin important de signaler que la codification de ces nouveaux procédés progresse activement : la fabrication additive est en cours d'intégration dans les sections de l'ASME consacrées aux appareils sous pression. Les codes ASTM et ISO prennent déjà en compte les matériaux issus de fabrication additive dans les standards d'évaluation (voir ISO NP 23669.3 à titre d'exemple).



Exemple de grille d'assemblage répondant au design préliminaire du projet de réacteur de 4^{ème} génération ASTRID obtenue via les procédés de fabrication additive

RECYCLAGE DES MÉTAUX DE TRÈS FAIBLE ACTIVITÉ (TFA)

En France, les déchets dits "de très faible activité" sont principalement issus du démantèlement des sites nucléaires et d'autres activités industrielles. Ces déchets sont considérés comme "non radioactifs" dans de nombreux pays européens. En France, ils sont considérés comme des déchets radioactifs (très faiblement actifs TFA) et sont stockés dans une installation spécifique.

La législation française impose en effet de considérer comme potentiellement radioactif tous les déchets issus d'une installation nucléaire.

Elle apparaît en revanche comme contestable car elle ne permet pas de recycler des matériaux à très faible activité qui ne présentent aucun danger pour l'homme.

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

Les déchets de très faible activité (TFA) sont des matériaux issus du secteur industriel, il s'agit de la catégorie de déchets la moins dangereuse car la moins radioactive (leur activité est située en dessous de 100 becquerels par gramme). Il s'agit en revanche des déchets les plus difficiles à stocker.

Les TFA sont des déchets qui ont été en contact avec les composants peu radioactifs des centrales nucléaires (tels que les générateurs de vapeur). Ils affichent ainsi un taux de radioactivité très faible, proche de la radioactivité naturelle (les TFA sont d'ailleurs considérés tels quels au bout de quelques années).

Considérés potentiellement contaminés malgré leur radioactivité faible, voire inexistante, les TFA sont systématiquement stockés au Centre industriel d'entreposage et de regroupement (Cires) de l'Andra, dans l'Aube. Ce volume de déchets de très faible activité va considérablement s'accroître avec les opérations de démantèlement d'installations nucléaires à venir. Le volume de TFA devrait en effet atteindre les 2,3 millions de m³ une fois que l'ensemble des opérations de démantèlement du parc nucléaire français auront été achevées. Le stockage d'une telle quantité de déchets apparaît comme un véritable défi pour notre pays. La saturation du seul centre de stockage existant, situé à Morvilliers (Aube) est attendue pour 2025.

Revaloriser les TFA métalliques grâce au traitement par fusion

Parmi les solutions envisagées pour faire évoluer le système de traitement des TFA, le recyclage des métaux par fusion est une des pistes les plus souvent envisagées. Éprouvée en Suède depuis de nombreuses années, cette technique consiste à "nettoyer" les déchets métalliques puis de les fondre afin de les transformer en lingots homogènes et ainsi leur permettre d'être revalorisés sur le marché.

Les TFA métalliques étant faiblement radioactifs, leur traitement par fusion permet de retirer les éventuelles traces de radioactivité et donc de produire un lingot qui ne présente aucun risque pour l'homme.

Concernant les matériaux métalliques, les producteurs évaluent sur la période 2015-2070 à plus de 900.000 tonnes la masse de déchets TFA [très faible activité, NDLR] potentiellement valorisables », indique l'Etat.

Soucieux de se montrer exemplaires en matière de sûreté et de radioprotection, les industriels proposent de conditionner la revalorisation des déchets peu voire pas radioactifs avec un seuil de radioactivité maximal à ne pas excéder.

Baptisé "seuil de libération", ce type de dispositif, déjà utilisé dans les autres pays de l'Union Européenne, permettrait de s'assurer que le métal recyclé puis revendu ne présente aucun danger pour les citoyens et le grand public.

L'état français se réoriente vers le recyclage des déchets TFA

L'exécutif va introduire une possibilité de dérogations ciblées permettant une valorisation au cas par cas de déchets radioactifs métalliques de très faible activité.

Le 21 février 2020 le ministre de la Transition écologique et le président de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ont annoncé vouloir autoriser la valorisation de certains déchets métalliques de très faible activité.

Les réflexions sont bien avancées chez les industriels. En 2016, EDF a acquis une entreprise suédoise, Studsvik, utilisant un procédé de traitement par fusion qui permet de concentrer la radioactivité dans les résidus, et de reconditionner les métaux en lingots qui sont ensuite réutilisés dans tous types

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

d'industries. Et dans le cadre de la fermeture de la centrale nucléaire de Fessenheim (Haut-Rhin) et du « contrat de territoire » qui vise à le revitaliser, EDF propose de construire un four à fusion qui permettrait ce recyclage des métaux. Il était initialement imaginé sur le site de Tricastin (Drôme), proche de Socodei, une filiale d'EDF déjà spécialisée sur le traitement des métaux contaminés.

Pression européenne pour le recyclage

En parallèle l'appel d'offre EURATOM 2021 réserve un chapitre complet à l'harmonisation de la gestion des déchets, et en particulier au recyclage des déchets TFA.

En effet des pays majeurs européens comme la Suède et l'Allemagne pratiquent déjà le recyclage des métaux TFA.

L'avenir du démantèlement des réacteurs nucléaires en Europe passera par le recyclage des métaux TFA.

Références

- [1] T. Beck, V. Blanc, J.-M. Esclaine, M. Pelletier, M. Phelip, et al.. Pre-conceptual design of ASTRID fuel sub-assemblies. ICAPP 2016 – International Congress on Advances Nuclear Power Plants, Apr 2016, San Francisco, United States. Paper 16163
- [2] F. Dalle, M. Blat-Yrieix, S. Dubiez-Le Goff, C. Cabet, Ph. Dubuisson, Conventional austenitic steels as out-of-core materials for Generation IV nuclear reactors in Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors
- [3] Bassem Barkia, Pascal Aubry, Paul Haghi-Ashtiani, Thierry Auger, Lionel Gosmain, Frédéric Schuster, Hicham Maskrot, On the origin of the high tensile strength and ductility of additively manufactured 316L stainless steel: Multiscale investigation, Journal of Materials Science & Technology 41 (2020) 209–218
- [4] David W. Gandy, FASM, Davgandy@epri.com Technical Executive, Nuclear Materials Presented at: Valve Manufacturers Association Technical Seminar Las Vegas March 5-7, 2014
- [5] 2015 DOE-NEET: Environmental Cracking and Irradiation Resistant Stainless Steel by Additive Manufacturing (AM) Xiaoyuan Lou (loux@ge.com) Ceramics and Metallurgy Technologies, GE Global Research, Niskayuna, NY 2015 DOE AMM Workshop, Arlington, VA Sep. 29, 2015
- [6] Additive manufacturing of ITER first wall panel parts by two approaches: Selective laser melting and electron beam melting Yuan Zhong, Lars-Erik Rännar, Stefan Wikman, Andrey Koptuyug, Leifeng Liu, Daqing Cui, Zhijian Shen, Fusion Engineering and Design 116 (2017) 24–33
- [7] Suk-Kwon Kim*, Chang Wook Shin, Dong Jun Kim, Seong Dae Park, Hyung Gon Jin, Eo Hwak Lee, Jae-Sung Yoon, Dong Won Lee, Bonding techniques and performance qualification of plasma facing components for Korean fusion research, Fusion Engineering and Design 136 (2018) 1510–1513
- [8] M. Richoua, F. Gallaya, B. Boswirthb, I. Chuc, G. Dosed, H. Greunerb, G. Kermouchee, M. Lencif, Th. Loewenhofff, R. Maestraccig, E. Meillotg, M. Missirliana, J.Y. Pastorh, A. Quetg, S. Roccellai, E. Tejadoh, M. Wirtzsf, E. Viscai, G. Pintsukf, J.H. Youb, Performance assessment of thick W/Cu graded interlayer for DEMO divertor Target, Fusion Engineering and Design 157 (2020) 111610
- [9] 3D-printed fusion components concepts and validation for the UST2 stellarator, V. Queral, Fusion Engineering and Design 96–97 (2015) 343–347
- [10] Vicente Queral, Santiago Cabrera, Esther Rincón, and Vicente Mirones, Prospects for Stellarators Based on Additive Manufacturing: Coil Frame Accuracy and Vacuum Vessels, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 46, NO. 5, MAY 2018
- [11] J. Bischoff, C. Delafoy, N. Chaari, C. Vauglin, K. Buchanan, et al. Cr-coated cladding development at Framatome. Topfuel 2018 – Light Water Reactor (LWR) Fuel Performance Meeting 2018, Sep 2018, Prague, Czech Republic. cea-02328963

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

- [12] Michau, Alexandre and Maury, Francis and Schuster, Frédéric and Lomello, Fernando and Brachet, Jean-Christophe and Rouesne, Elodie and Le Saux, Matthieu and Boichot, Raphaël and Pons, Michel High-temperature oxidation resistance of chromium-based coatings deposited by DLI-MOCVD for enhanced protection of the inner surface of long tubes. (2018) *Surface and Coatings Technology*, 349. 1048-1057. ISSN 0257-8972
- [13] A. Michau, Y. Gazal, F. Addou, F. Maury, T. Duguet, R. Boichot, M. Pons, E. Monsifrot, H. Maskrot, F. Schuster, Scale up of a DLI-MOCVD process for the internal treatment of a batch of 16 nuclear fuel cladding segments with a CrCx protective coating, *Surface & Coatings Technology* 375 (2019) 894–902
- [14] F. Schuster, HIPIMS TECHNOLOGY FOR EXTREME ENVIRONMENTS, **45th** International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF), 2018
- [15] F. Schuster, Advanced manufacturing technologies for low carbon energy : opportunities for nuclear applications, 5th International Workshop on Structural Materials for Innovative Nuclear Systems (SMINS-5) organized in cooperation with the IAEA
- [16] He, X., Xie, C., Xiao, L. et al. Microstructure and impact toughness of 16MND5 reactor pressure vessel steel manufactured by electrical additive manufacturing. *J. Iron Steel Res. Int.* 27, 992–1004 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42243-020-00467-0>
- [17] Roadmap for Regulatory Acceptance of Advanced Manufacturing Methods in the Nuclear Energy Industry, Nuclear Energy Institute, May 13, 2019

6-6 Matériaux poreux pour l'énergie et l'environnement

Vanessa Fierro et Alain Celzard

Institut Jean Lamour, Equipe Matériaux Biosourcés, Département N2EV

Mots Clefs : matériaux poreux biosourcés, mécanosynthèse, carbones nanostructurés, énergie, environnement

Les **matériaux poreux** ont un bel avenir devant eux car ils sont de plus en plus utilisés pour la **séparation, le stockage et la compression des gaz et, comme support de catalyseurs** dans les applications liées à l'énergie, telles que les électrodes de piles à combustible, électrolyseurs et supercondensateurs. Le défi reste **d'obtenir ces matériaux à partir de matières premières renouvelables au lieu d'utiliser des précurseurs pétrochimiques**.

Nombre de ces matières renouvelables sont dérivées d'extraits de plantes, en particulier de polyphénols tels que la **lignine, le phloroglucinol ou le tanin ou d'autres résidus de la bioraffinerie tels que les humines**. Leur polymérisation permet d'obtenir, selon les conditions expérimentales, des mousses rigides, des gels solides ou des résines. La priorité est donnée à l'eau comme milieu réactionnel et à l'utilisation de la mécanosynthèse pour la nanostructuration de ces matériaux poreux, mais aussi pour le dopage avec des hétéroatomes et des métaux de transition une fois que les résines sont carbonisées.

Les gels et les mousses organiques sont utilisés comme **isolants thermiques et acoustiques**. Les résines peuvent être utilisées pour l'impression 3D et comme précurseurs de matériaux à porosité hiérarchisée et parfaitement contrôlée après carbonisation. Les matériaux imprimés en 3D peuvent être utilisés pour la séparation de gaz ou comme support de catalyseurs, offrant une perte de charge extrêmement basse. Parmi les applications les plus importantes de la séparation des gaz dans les années à venir figurent **l'épuration de biogaz, la purification de gaz naturel, la séparation de CO₂ des gaz de combustion ou la séparation de gaz nobles de l'air**. Les matériaux carbonés produits à partir d'une grande variété de résines de différentes compositions et avec différentes échelles de porosité permettent d'envisager des matériaux à haute valeur ajoutée tels que tamis moléculaires, électrodes, catalyseurs ou écrans électromagnétiques.

Si des **matériaux biosourcés** présentent déjà de très bonnes performances pour toutes ces applications, une volonté politique et des moyens seront nécessaires pour les faire véritablement accepter en tant qu'alternatives et les imposer dans le monde industriel.

6-7 Matériaux du futur : les Métamatériaux

Badreddine ASSOUAR - Institut Jean Lamour / Laboratoire N2EV

Mots Clefs : Métamatériaux, acoustique, intelligence artificielle, électromagnétisme, bio-ingénierie, énergie

Notre monde est fait de matériaux plus ou moins avancés, structures multi-échelles, communication, d'outils d'intelligence artificielle, utilisation des données, maîtrise des procédés... Les matériaux, de manière générale, permettent d'opérer les défis que nos sociétés ont et auront à affronter, que cela soit pour la transition énergétique, numérique ou environnementale.

Les matériaux forment un des piliers principaux de ces différentes transitions.

Une nouvelle catégorie de matériaux innovants, les « **métamatériaux** », préparent les outils de demain.

« En physique, en acoustique ou électromagnétisme, le terme **métamatériau** désigne un **matériau composite artificiel qui présente des propriétés qu'on ne retrouve pas dans un matériau naturel** ».

Il s'agit en général de structures composites et artificielles, qui se comportent, sous certaines conditions, **comme des matériaux homogènes** n'existant pas à l'état naturel. Il existe plusieurs types de métamatériaux relatifs aux différents types d'ondes : acoustiques, élastiques, électromagnétiques, mécaniques ... L'émergence des métamatériaux **acoustiques**, notamment, au début des années 2000 a ouvert un champ nouveau en physique, traitant des propriétés uniques et disruptives qu'ils présentent et des applications très prometteuses et concrètes qui en découlent.

Les métamatériaux ont dépassé la phase de l'émergence malgré leur jeune âge, et leur développement en termes de recherche fondamentale et appliquée est bien avancé. Un certain nombre de preuves de concept a même vu le jour pour les **applications liées à l'absorption acoustique, à l'holographie et l'imagerie acoustique, aux antennes et radars HF, à la furtivité ou encore à la collecte d'énergie**. La grande force des métamatériaux est qu'ils offrent de nouvelles fonctionnalités et de meilleures performances par rapport aux matériaux existants et aux démonstrateurs associés. Ils présentent également un fort intérêt autant pour les applications civiles que militaires. La maturation qui est en train d'être atteinte par ces matériaux artificiels, notamment avec l'avènement de l'intelligence artificielle, les positionne au premier plan des **technologies émergentes et peu consommatrices en énergie**. Depuis peu, des premiers transferts industriels commencent à s'opérer notamment dans les domaines de **l'automobile, l'aéronautique, le bâtiment, où des produits finis à base de métamatériaux ont été réalisés et commercialisés**.

Les métamatériaux feront indubitablement partie des **enjeux majeurs d'avenir** tant sur le plan scientifique qu'industriel. La transition complète de la phase recherche vers la phase de l'innovation nécessitera tout de même un investissement certain du monde académique et industriel.

6-8 Matériaux et Mobilité

Contributeurs : François MOUSSY, Éric MAIRE, Danièle QUANTIN, Jean-Yves GUEDOU

Mots Clefs : automobile, aéronautique, environnement, services

Constat Post COVID sur le thème

Au-delà des périodes de confinement et donc de « gel » de la mobilité, la situation tant de l'automobile que de l'aéronautique ne sera pas la même avant et après la COVID 19.

- Les stratégies des constructeurs n'avaient pas prévu une telle situation et celles-ci doivent être repensées en tenant compte de paramètres d'incertitudes forts.
- Le repositionnement sur le marché des constructeurs automobiles va dépendre de la situation sanitaire de chaque pays et de l'accompagnement associé. Des risques économiques existent pour les sous-traitants de la filière. Les pays d'Asie risquent d'en sortir encore plus forts.
- Les filières déjà très « numériques » vont voir encore une accélération dans ce domaine comme toute l'industrie d'ailleurs
- Les utilisateurs vont très probablement revoir leurs pratiques (moindres déplacements, vacances à plus courtes distances, usage de transports légers en ville, déménagement hors des grandes villes facilité par le télétravail , transports à longue distance en France via le train plutôt que l'avion – moins de déplacements professionnels pressés -...) cependant dans une logique peut être individuelle (peur des contacts) alors que les transports collectifs sont une meilleure solution environnementale (et donc des progrès pour des solutions techniques et services sont à développer trouver)
- Les utilisateurs sautent le pas vers des véhicules hybrides ou électriques grâce aux incitations financières mais pas que (sensibilité « écologique » en plus de l'économique).
- Réparabilité, réutilisation de pièces (en particulier de carrosseries continueront à se développer dans un marché parallèle au neuf constructeur qui doit être contrôlé et garanti. Il y a peut-être des méthodes de contrôle non destructif à adapter pour qualifier les matériaux de ces pièces.
- Il y a tout un pan de développements et d'industrialisation à accélérer, production d'hydrogène, stockage, batteries, mais aussi en pensant économie circulaire.
- C'est aussi l'opportunité de repenser la chaîne de valeur autour d'un "Service mobilité" et pas seulement l'objet mobilité par exemple l'auto partage qui au-delà de la tenue mécanique d'un véhicule à utilisateurs multiples (suivi maintenance spécifique) nécessitera une évolution des matériaux et de leur nettoyabilité, anti bactérien, antivirus, anti salissures, assainissement à l'ozone, réduction des contacts
- Des rêves à la Jules Verne vont aussi très probablement s'accélérer, taxis volants, robots taxi...

Alerte/Enjeu N° 1 : Des matériaux adaptés aux challenges

La course à l'allègement va continuer tout en recherchant l'augmentation de la durée de vie des structures et des moteurs des véhicules routiers, aériens, aérospatiaux. Les nouveaux matériaux qui seront développés auront des combinaisons de propriétés supérieures pour permettre d'alléger encore plus les structures des véhicules pour en réduire la consommation énergétique et matériaux eux-mêmes (durée de vie allongée).

Les matériaux de haute technologie du fait de leur composition chimique impactent fortement l'environnement lors de leur fabrication et de leur utilisation et c'est un point d'attention

Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID

environnemental. Donc la science des matériaux a évidemment des choses à dire et à faire sur le sujet de la recyclabilité.

La réduction des émissions de cette activité humaine passera sans doute plus par une diminution du transport individuel que par l'amélioration incrémentale des propriétés et de la durée de vie.

Alerte Enjeu N°2 (Automobile) : S'intéresser aux matériaux mais également à leur mise en œuvre.

Un exemple : profilage par roulage car procédé ancien mais étant l'un des seuls permettant de former à froid des aciers THLE. Ce procédé pourrait être plus utilisé en particulier l'architecture des véhicules électriques doit autoriser plus de composants rectilignes. De même que pour l'emboutissage, la simulation numérique pourrait repousser les limites de ce procédé pour des aciers TTHLE voire des alliages d'aluminium difficilement extrudables.

Il y a un intérêt notable à développer des fournisseurs français de technologies de mise en œuvre comme DREISTERN.

Alerte/Enjeu N° 3 (Aéronautique) : Les voyages aériens « de masse » seront peut-être très fortement réduits après la période Covid-19.

Les besoins des compagnies aériennes pourraient évoluer sensiblement d'où recherche d'avions à plus faible coût d'achat et d'exploitation. Les matériaux peuvent être impactés.

Alerte/Enjeu N°4 (Aéronautique) : L'avion à Hydrogène ?

Il y a un sujet qui fait actuellement l'objet d'un véritable emballement politico-médiatique (sans doute exagéré !), l'avion à hydrogène.

C'est aujourd'hui un débat plus stratégique que technique mais il va falloir aller plus loin dans les détails technologiques et l'aspect matériaux devra être pris en compte. L'hydrogène est un élément particulier : de par son atome de très petite taille, il est très réactif et sujet à diffusion facile dans les métaux avec risque de fragilisation et autres conséquences.

La seule expérience de propulsion avec de l'hydrogène est actuellement le domaine spatial, où cela est plutôt satisfaisant. Mais les conditions de fonctionnement aéronautique sont très différentes de celles du spatial, en particulier l'aspect temps – durabilité est de plusieurs ordres de grandeur plus important dans l'aéronautique, ce qui va générer de nouvelles contraintes.