**Table Ronde «Les verrous technologiques des matériaux métalliques pour la production et le stockage d’énergie »**

Jeudi 11 Avril 13h40-15h20

Animateurs : J-L Béchade (CEA-DEN, RNM)

Participants : Etienne Bouyer (CEA-DRT LITEN, Labo. d’Innovation pour les Techno Nouvelles et les Nouveaux Matériaux), Jean Dhers (Framatome), Michel Piette (VALLOUREC).

Après un premier échange introductif concernant l’analyse de l’existant au sujet de la métallurgie pour l’énergie, cinq thèmes ont été spécifiquement abordés au cours des débats, en passant en revue pour chaque thème les 3 grands domaines d’énergie (Energie Carbonée, Energie Nucléaire, Energie Renouvelable). Pour chaque thème abordé s’en est suivi un échange avec la salle.

**La métallurgie pour l’énergie : une première analyse de l’existant**

* + Energie carbonée : pétrole, gaz…quelles sont les types de matériaux employés et pour quelles applications :

- Pour le « vertical » (=du sol jusqu’au gisement) :

Aciers au carbone (C=0.2-0.4, Cr=0.2-1.0, Mo=0 – 1.0, Mn, Nb, V, B) pour la plupart des puits, y.c. contenant de l’H2S (=fragilisation par l’hydrogène). Microstructure = martensite revenue, Rp0.2 = 80-140 ksi

Aciers au Chrome (13%Cr) pour les puits contenant du CO2 (corrosion généralisée). Microstructure = Martensite revenue

Aciers CRA (corrosion resistant alloys) lorsqu’il y a bcp de CO2 : Duplex et SuperDuplex

- Pour l’horizontal (pipeline) : les aciers doivent être soudables => restrictions sur le Ceq

Aciers au carbone (C=0.05-0.09, Cr Mo Nb V Ti mais <<0.5%)

Aciers au Chrome à très bas carbone (aka Super13%Cr)

Aciers CRA, mais plutôt en tant que tube « claddé » (tube au carbone revêtu à l’intérieur d’acier allié, parce que la corrosion a lieu en peau intérieure).

* + Position forte du nucléaire en France : la métallurgie pour le nucléaire a connu et connait encore de forts développements. Pour les besoins actuels, quels sont les différentes classes de métaux employées et pour quelles applications :

4 grandes familles d’alliages métalliques couvrent plus de 90% des composants du circuit primaire : les aciers ferritiques Mn-Mo-Ni pour la cuve et les grands composants (générateur de vapeur (ou GV) et pressuriseur), les aciers inoxydables austénitiques 304L et 316L pour les internes de cuve, la pompe et des parties de l’assemblage combustible, l’inconel (base Ni) pour les tubes de GV, et enfin les alliages de Zr pour le gainage des crayons de combustible.

Le nucléaire est très conservateur pour les matériaux et préfère souvent améliorer les technologies de fabrication plutôt que de changer de nuance.

* + Le développement durable, dans ce domaine des énergies renouvelables plusieurs thèmes :

Piles à combustibles, techno hydrogène, où en est-on ? quels sont les sujets matériaux investigués : l’augmentation de la durée de vie couplée à une baisse des coûts des composants représente les priorités impliquant de vraies conséquences sur les matériaux. Des sujets matériaux concernent la minimisation voire la substitution complète du platine (catalyseur nécessaire aux réactions se passant aux électrodes) et la compréhension des mécanismes de vieillissement des catalyseurs, à travailler sur les plaques bipolaires performantes et résistantes à la corrosion. Préparer la filière hydrogène implique également de s’intéresser à son stockage, à son transport. La métallurgie à toute sa place par exemple pour limiter les problèmes de fragilisation hydrogène des structures de transport de ce vecteur énergétique.

* + Autres : solaire, (éolien), …la métallurgie est-elle présente :

La métallurgie du silicium bien qu’établie peut encore être améliorée pour répondre aux exigences du Photovoltaïque (PV). Une des problématiques de l’éolien concerne la conversion de l’énergie mécanique en énergie électrique grâce à des aimants permanents. La réduction des terres rares dans la composition de ces alliages magnétiques constitue un enjeu important tout comme la fin de vie, le recyclage de ces composants.

**Dans chacun de ces domaines** *(Energie Carbonée, Energie Nucléaire, Energie Renouvelable),* **quels sont les sujets en cours de développements et projets de R&D, innovations. Présence de verrous scientifiques**? *(ex. photovoltaïque, Nucléaire : Gen4, autres filières, fusion … ?)*

En ce qui concerne le pétrole et gaz, les développements visent

* D’une part à mettre au point des matériaux plus performants rendus nécessaires pour l’exploitation de puits de plus en plus complexes :
  + Profondeur (nécessitant des limites d’élasticité supérieures),
  + Haute Pression + haute température + environnements plus sévères (fragilisation par l’hydrogène, corrosion généralisée) (or la fragilisation par l’hydrogène est d’autant plus présente lorsque les limites d’élasticité sont supérieures
* D’autre part, trouver de nouveaux optimums techno-économiques (=baisser les couts d’usage) pour faire face aux fluctuations des prix du pétrole qui affectent la rentabilité d’un puits. Baisser les coûts d’usage sur la chaine de valeur complète passe par plusieurs leviers : les coût du matériau (éléments d’alliage), de son process de fabrication (traitement thermique, …), de sa mise en œuvre (soudage, ….).

Pour ce qui concerne le nucléaire, peu d’évolution à court et moyen termes. L’évolution du réacteur EPR actuel, jugé trop cher, se dirige vers une standardisation du design, des techniques de fabrication et de la supply chain. Une évolution à plus long terme est attendue avec le projet EPR NID qui remettra certainement en cause le design pour des gains significatifs. A plus long terme les réacteurs de génération 4 permettrons de consommer moins d’uranium. La France sur ce sujet a pris l’orientation des réacteurs à sodium liquide déjà bien connus.

Un des verrous à l’innovation en France est certainement l’autorité de sûreté nucléaire.

Pour le PV, les enjeux actuels sont de diminuer les coûts, d’augmenter les performances (rendement de conversion photovoltaïque), de favoriser l’implantation du PV non plus en plein champ (limiter l’empreinte au sol et le conflit d’usage) mais de l’associer au bâti existant ou en intégrant les modules PV harmonieusement lors de la conception des bâtiments (BIPV : Building integrated PV). Côté matériaux de cellules PV, on parle beaucoup des structures pérovskites à haut rendement, moins énergivores quant à leur production et mise en forme versus le silicium. Toutefois ces structures pérovskites contiennent du plomb, d’où des travaux sur sa substitution.

**Les formations sont-elles suffisantes pour aborder ces sujets** : *nucléaire : années 70-80 bcp de réacteurs construits, aujourd’hui moins : compétences toujours présentes ? Nouvelles voies ENR nos formations sont-elles adaptées? Quid de l’avenir NRJ carbonée ? Recrutements dans ces filières ?*

En ce qui concerne le pétrole et gaz, nous n’identifions pas à travers les recrutements que nous réalisons de manques significatifs dans la formation des jeunes (docteurs, ingénieurs et techniciens), à l’exception notable du niveau d’Anglais qui reste une faiblesse récurrente. Trop souvent, des jeunes ayant des scores honorables aux tests standards (TOEFL, …) se révèlent incapables de faire une présentation en Anglais, d’y défendre leurs résultats et leurs arguments, …. L’Anglais écrit est évidemment une exigence fondamentale, mais comment peut-on imaginer travailler dans un groupe international où l’Anglais est la langue de travail sans pouvoir travailler (=échanger, argumenter, convaincre) à l’oral ?

La France possède quelques formations spécifiques nucléaires (INSTN du CEA, notamment Génie Atomique). Elles sont peu nombreuses. Mais en même temps les besoins sont plus larges que le seul nucléaire : hydrauliciens, chaudronnerie, métallurgie, soudage, calculateurs…Il y a des domaines où il est difficile de trouver des candidats (soudeurs, contrôleurs, maintenance, usineurs, calculateurs en mécanique, thermohydraulique…).

Beaucoup d’écoles d’ingénieurs, d’universités offrent des options, des spécialisations qui abordent les EnR sous différents aspects (technique, économique,…). Il y a un effet de mode, d’attraction aussi. Même si les étudiants sortant de formations teintées EnR ne rejoignent pas tous des métiers liés aux EnR, ces profils pourront le moment venu intégrer des postes quand l’offre EnR sera plus conséquente.

**Position de la France par dans l’environnement international** *(tissu industriel en France…) ? Réponses différentes dans chaque domaine ?*

La France est raisonnablement bien placée dans les compétences nécessaires à l’activité « pétrole et gaz ». Nous n’avons pas / peu d’exemples où nous avons dû rechercher à l’étranger des compétences nécessaires. Par contre, à travers la filiale Brésilienne de Vallourec située à Belo Horizonte, nous avons un « benchmark » avec l’Université UFMG qui forme chaque année de nombreux et excellents étudiants en matériaux, qui sont très directement opérationnel (sur le plan scientifique, technique, savoir-être et langues). Je ne sais pas par contre exactement ce qui distingue leur formation de celle des étudiants français.

Autrement dit : ne nous endormons pas, il y a hors de France / d’Europe d’excellentes écoles qui pourraient nous concurrencer à moyen terme.

La France pour le nucléaire se positionnait non seulement comme un concepteur et un fabriquant de réacteur, mais aussi un fabriquant de composants du circuit primaire et de combustible nucléaire, grâce à ses usines de Creusot Forge, de St Marcel, (assemblage cuve, GV pressurieur) de Jeumont (pompe et mécanisme de commande de grappes), d’Ugines (et toutes les usines de mise en forme d’alliages de Zr), et de Romans (combustible). La taille des réacteurs grossissant, des limites ont été atteintes à la forge, qui imposent de forger certains très gros composants au Japon.

Les tubes de GV (presque la moitié du coût d’un GV) sont entièrement réalisés en France.

Parallèlement les pays comme l’Inde ou la Chine où réside le vrai marché actuel du nucléaire, souhaite qu’une grande partie des fabrications soient réalisées chez eux, créant ainsi des concurrents potentiels dans le futur.

Concernant les EnR, la France accuse un retard sur le déploiement de ces énergies (solaire PV, éolien) malgré un potentiel réel et favorable à ces énergies sur le territoire. Retard par rapport à des voisins européens, comme l’Allemagne ou d’autres pays du nord de l’Europe. Néanmoins, la loi de transition énergétique permet d’inscrire durablement la France dans une trajectoire visant un mix énergétique plus varié. Le récent plan hydrogène illustre une volonté de mener des expérimentations, des démonstrations sur les territoires. Les grands énergéticiens français entament un virage vers les EnR pour renforcer leurs positions en France et dans le monde aussi sur ce secteur. A cet égard, l’initiative européenne sur les batteries, dont les pays moteurs sont l’Allemagne et la France, abouti à une forte implication d’acteurs industriels français (Saft, Peugeot,…).

**Poids de la simulation dans ce domaine de l’énergie** : *modélisation et approche numérique : où en est-on, ex. Nucl. : utilisation des particules chargées, IA (réseaux de neurones, big data…) Mais aussi Ex. Nucléaire : position par rapport à l’ASN modélisation des propriétés pour la certification, très fort conservatisme de certaines filières (poids des aspects sureté)*

Les expériences que nous avons eues en ce qui concerne le pétrole et gaz nous ont rendu prudents en ce qui concerne la modélisation : Il semble que les modèles thermodynamique (ThermoCalc) et thermocinétiques (MatCalc) sont des cadres intellectuels permettant de construire des raisonnements (conception de plans d’expérience pour explorer le rôle de la microstructure, ….) et pour expliquer / synthétiser a posteriori des résultats.

Il ne semble pas que ces modèles (Thermocalc, MatCalc) aient déjà des potentiels prédictifs précis, y.c. dans des domaines d’aciers « simples » (C Mn Cr Mo Nb V, trempe + revenu).

La simulation numérique est partout dans le nucléaire avec des codes souvent élaborés en partenariat avec EDF et le CEA, de neutroniques, de thermohydrauliques de CFD, mais aussi des codes de procédés de fabrication. Les codes permettent de justifier le design, et d’optimiser les fabrications. Des efforts importants sont faits pour comprendre les mécanismes, à partir desquels on élabore des modèles, qui permettront la simulation numérique (simulation multiphysique du soudage, évolution de la microstructure sous irradiation…). Framatome suit les développements récents dans la simulation numérique : chainage des codes, couplage des codes, métamodèles, codes d’optimisation comme les algorithmes génétiques….

Les EnR, intrinsèquement amenés à se déployer de manière décentralisée, vont dans leur production & gestion optimisées générer un grand nombre de données : la transition énergétique est intimement liée à la transition numérique. Dans le domaine des composants pour les EnR, l’approche numérique a toute sa place : les nouveaux matériaux seront conçus grâce à un design numérique permettant d’accélérer leur industrialisation et de répondre à des contraintes (propriétés/performances, durabilité, composition avec des substances abondantes,…).

**Enjeux sociétaux** : *nucléaire, poids du politique, acceptation grand public vs énergie renouvelable, hydrogène (réservoir sous pression), réchauffement climatique*

En ce qui concerne le pétrole et gaz, nous sommes occasionnellement confrontés à des difficultés d’adhésion de quelques jeunes ingénieurs au fait de travailler pour un domaine d’énergie carbonées.

Le nucléaire s’est bâti en France sans consultation du peuple. Nous avons cependant l’électricité la moins chère d’Europe et la plus décarburée. Le renouvellement du parc nucléaire se fera certainement sur des sites déjà nucléarisés. Un nouveau concept de réacteur est apparu qui se veut plus acceptable par le public, il s’agit du Small Modular Reactor. Ces réacteurs de plus petite puissance (10 fois moins que les réacteurs actuels) et dont la sûreté est entièrement passive (pas besoin de moteurs diésel en cas d’accident) souhaite rassurer le public.

La tendance actuelle d’une frange de la population à s’opposer à de grands projets ne facilite pas l’implantation des EnR. On le voit sur les champs de PV, sur l’éolien (offshore). Aussi, l’éducation des populations dans l’ensemble des territoires aux grands enjeux (indépendance énergétique, adaptation au changement climatique), l’explication des solutions que peuvent apporter les EnR devraient faciliter l’acceptation sociétale de populations.

Tout systèmes concentrant de l’énergie avec une forte densité pose potentiellement des problèmes de sécurité. L’hydrogène n’échappe pas à cela mais tout comme pour les batterie Li-ion, leurs composants, leurs systèmes sont testés dans des situations incidentelles (tests abusifs) pour les dimensionner au mieux. Pour l’hydrogène précisément, un nouveau mode de stockage via des phases liquides (LOHC, Liquid Organic hydrogen Carrier) permettent de contourner les problèmes potentiels du stockage hyperbare.