

**2022 Projet Proposition d'un module de cours à destination des doctorants**

**I. Informations générales :**

|   |  |
|---|--|
| Etablissement d'accueil<br><i>Institution</i>     | <input checked="" type="checkbox"/> UP <input type="checkbox"/> ENSMA  |
| TITRE du cours en français<br><i>French title</i> | PHENOMÈNES MULTI-PHYSIQUES LIÉS AUX TRANSPORT, STOCKAGE ET USAGES DE L'HYDROGENE POUR LA MOBILITE  |
| TITRE du cours en anglais<br><i>English title</i> | MULTI-PHYSICS ISSUES DERIVED FROM TRANSPORT, STORAGE AND MOBILITY USES OF HYDROGEN AS AN ENERGY VECTOR   |
| Enseignant<br><i>Teacher</i>                      | Anthony THOMAS ( <a href="mailto:anthony.thomas@univ-poitiers.fr">anthony.thomas@univ-poitiers.fr</a> ; 05 49 45 38 11) / Gilbert HENAFF ( <a href="mailto:gilbert.henaff@ensma.fr">gilbert.henaff@ensma.fr</a> ; 05 49 49 82 33) / Damien HALM ( <a href="mailto:damien.halm@ensma.fr">damien.halm@ensma.fr</a> ; 05 49 49 82 31) / Sylvie CASTAGNET ( <a href="mailto:sylvie.castagnet@ensma.fr">sylvie.castagnet@ensma.fr</a> ; 05 49 49 82 26) |

| Jours | Horaire | Salle |
|-------|---------|-------|
|       |         |       |
|       |         |       |
|       |         |       |
|       |         |       |
|       |         |       |
|       |         |       |

**II. Brève description du cours proposé**

NB : Ce document est rédigé en français mais le cours sera proposé en anglais.

**DESCRIPTION ET OBJECTIFS**

Si l'émergence de la filière hydrogène en France et en Europe rend le terme plus familier du grand public, la réalité des enjeux scientifiques du déploiement de cette filière est encore assez méconnue et peu enseignée. L'objectif de ce cours doctoral est de fournir quelques repères sur les enjeux actuels et les perspectives, mais surtout d'évoquer quelques problèmes scientifiques que pose ce nouveau vecteur d'énergie, à différents stades de la chaîne Production - Transport - Stockage - Usage.

Les couplages entre diffusion d'espèces et/ou de chaleur, dégradation chimique, transport de charges électriques et comportement mécanique sont au coeur de la plupart des problématiques qui seront exposées. Dans un certain nombre de cas, ces effets de couplages se situent en surface ou aux interfaces entre constituants. Le contenu du cours entre à ce titre dans le périmètre des thèmes 1 et 3 du Labex.

Ce cours de 10h, proposé en anglais, associe quatre intervenants, spécialistes chacun d'un des volets du programme, mais à même de faire des liens entre eux. Il est conçu comme un

« cours thématique » transverse, susceptible d'intéresser un large public de doctorants, désireux de compléter leurs connaissances dans le domaine, qu'ils travaillent sur l'un des volets du programme ou non. Dans une première étape, chacune des notions abordées sera donc introduite en des termes accessibles à des non-spécialistes.

## **PLAN DU COURS [5 x 2heures]**

### **Séance n°1 : Etat des lieux et enjeux du vecteur hydrogène**

Cet enseignement est dédié à l'introduction du vecteur hydrogène comme moyen de stockage et conversion de l'énergie. L'objectif est d'avoir un point de vue général sur la filière hydrogène, à la fois sur les enjeux et les verrous scientifiques de ce nouveau vecteur énergétique. Toute la chaîne hydrogène sera évoquée, de sa production, au transport, au stockage puis à son utilisation. Côté production, un focus sera fait sur l'électrolyse permettant notamment le stockage d'énergie électrique des énergies renouvelables. En effet, les énergies renouvelables, par nature intermittentes et variables, nécessitent le développement d'une infrastructure de stockage de l'énergie adaptée en taille et en flexibilité. Les différents moyens de stockage seront présentés (liquide, solide, gaz) et côté utilisation un focus sera fait sur les piles à combustibles à membrane utilisées principalement pour la mobilité. Les avantages et inconvénients du vecteur hydrogène sont présentés et l'évaluation de l'impact de ce vecteur en termes de baisse des émissions de GES et son intégration dans le mix énergétique futur sera donné. Les différents éléments de la chaîne seront détaillés de l'échelle de la cellule électrochimique (matériaux des composants, structuration, potentiel électrochimique, transfert de chaleur, de charge et de matière) à l'échelle du système (principe de l'électrolyse, pile à combustible, infrastructures de transport gazeux, stockage gaz, liquide, solide de l'H<sub>2</sub>). Les questions de recherche et verrous scientifiques seront détaillés plus précisément dans les cours suivants.

### **Séance n°2 : Fragilisation des aciers par l'hydrogène**

De par sa faible taille, l'atome d'hydrogène est susceptible de pénétrer puis de diffuser facilement à des températures proches de l'ambiante au sein des réseaux métalliques, ce qui entraîne une perte de performance mécanique (ductilité, résistance à la fissuration,...) désignée de manière générique par le terme « fragilisation par l'hydrogène » (FPH). Ce phénomène, bien que connu de longue date, requiert encore des travaux de compréhension et de modélisation d'autant plus complexes qu'ils nécessitent de relier des modifications de propriétés macroscopique à des processus se développent à des échelles extrêmement fines. Il soulève en outre, dans un contexte de développement d'une économie « hydrogène », la question de l'intégrité des structures de transport et de stockage de l'hydrogène gazeux sous pression, voire de composants embarqués. Cette séance se concentrera sur les aciers et abordera les points suivants :

- Aspects phénoménologiques de la FPH ; facteurs d'influence (pression, pureté du gaz, vitesse de déformation ou fréquence, microstructure...);
- Mécanismes de FPH : décohésion engendrée par l'hydrogène (HEDE), localisation de la plasticité favorisée par l'hydrogène (HELP) ; émission de dislocation induite par l'adsorption (AIDE) ; ...
- Pistes de modélisation à différentes échelles ;
- Aspects normatifs.

### **Séance n° 3 : Mécanique des réservoirs hyperbares : tenue en pression, tolérance au dommage et tenue au feu**

En raison de sa faible densité volumique d'énergie, le stockage de l'hydrogène dans les véhicules pose des difficultés. La voie la plus mature aujourd'hui est la compression à plusieurs centaines de bar afin de délivrer une quantité d'énergie en rapport avec les besoins d'autonomie des véhicules. Les réservoirs en service aujourd'hui se composent d'un liner polymère assurant l'étanchéité, des embases métalliques pour la connexion avec la pile à combustible et une coque en matériau composite combinant une faible masse volumique et une haute performance mécanique. L'acceptabilité sociétale d'un réservoir à

700 bar passe par la maîtrise du comportement de ces stockages dans des conditions extrêmes. On abordera dans ce cours trois situations sévères :

- Tenue à haute pression : caractérisation expérimentale et modélisation de l'endommagement des composites ; simulation de l'éclatement des réservoirs ; méthodologie d'optimisation des réservoirs pour réduire la masse de matériau composite.
- Tolérance à l'impact : observation des endommagements du composite consécutifs aux impacts de basse énergie ; conséquences sur la réduction de performance des réservoirs ; modélisation de l'effet des chocs sur la tenue résiduelle ; recommandation de dimensionnement
- Tenue au feu : différences de tenue au feu des structures métalliques et composites ; couplages thermomécaniques - décomposition chimique à l'interface composite - flux de chaleur ; systèmes de relâchement de pression ; concept de « fuite avant éclatement » ; optimisation des matériaux

#### **Séance n°4 : Couplages diffusio-mécaniques et endommagement des composants polymères**

A la différence des matériaux métalliques, les mécanismes d'interaction hydrogène - polymère affectent très rapidement l'ensemble du volume avec des modifications possibles de la loi de comportement et l'activation de mécanismes d'endommagement spécifiques, en particulier au cours des phases de décompression. Les conséquences de ces effets sont critiques pour la durabilité et la sécurité de certains composants. On peut citer par exemple le décollement de liners de réservoirs hyperbares, la durabilité de flexibles de stations de remplissage, l'étanchéité de joints élastomère. La séance abordera les points suivants :

- Mécanismes et cinétiques de diffusion de l'hydrogène dans les polymères ; propriétés de sorption : effets de la microstructure, de la température, de la pression / Méthodes de mesure (désorption, perméation)
- Couplage diffusio-mécanique : spécificités des essais mécaniques sous forte pression / influence de la pression d'hydrogène sur différents aspects du comportement quasi-statique et de la rupture / prise en compte des couplages dans la formulation de lois de comportement / optimisation des matériaux pour concilier les différentes sollicitations multi-physiques
- Endommagement associé à la décompression : enjeux de caractérisation expérimentale / mécanismes dans les différentes classes de polymères (thermoplastiques, élastomères, structures multi-couches) / facteurs d'influence (paramètres microstructuraux, conditions de sollicitation)

#### **Séance n°5 : Physique et optimisation de la Pile à Combustible**

Les piles à combustible est un système multiphysique faisant intervenir des activités de recherche dans le domaine de la chimie, l'électrochimie, la physique, la thermique et le génie électrique. Cette séance sera donc consacrée à l'étude des phénomènes physiques de transferts de charges, de masse et de chaleur au sein des piles à combustibles à membrane (PEMFC). La séance abordera la métrologie et moyens d'analyse multi-échelle permettant d'améliorer la compréhension des phénomènes multi-physiques, de l'étude des électrodes (double couche électrique), jusqu'à l'étude du système. Une présentation des mécanismes de transferts couplés au niveau de chaque interface, interfaces solide-liquide-gaz (point de triple contact) pour la membrane /électrode, interface électrode/couche de diffusion et interface couche de diffusion/plaque d'alimentation en gaz seront présentées et les métrologies et méthodes de diagnostic ((bruit électrochimique, descripteurs temporels et fréquentiels, identification paramétrique, étude par tomographie rayon X) permettant l'amélioration et la compréhension fine des phénomènes à ces interfaces seront développés. L'objectif étant l'amélioration des coûts, durabilité et performances des piles à combustibles.