MINES PARIS | PSL

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'ENSEMBLE DES PROJETS MIG [2022-2023]

CYCLE INGENIEURS CIVILS

UE 15 : 1er semestre /2022-2023

SOMMAIRE

P.2	MIG LH2
P.7	MIG OPTIM AERO
P.10	MIG SANTE
P.13	MIG OCEAN
P.16	MIG ALEF
P.19	MIG URANIUM
P.22	MIG VERRE 4.0
P.28	MIG SOLAIRE

TRANSPORT ET STOCKAGE DE L'HYDROGENE SOUS FORME LIQUIDE

Coordinateurs : Elise El Ahmar (CTP) et Faouzi Hadj Hassen (Géosciences)
Centres de recherche concernés : Centre Thermodynamique des Procédés (CTP) et Centre de Géosciences
Lieu : 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau, France

RESUME
L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers. Combiné à d'autres éléments, il est nécessaire de l'extraire de ces composés pour obtenir le dihydrogène H_2. Il constitue un vecteur énergétique qui peut être stocké et utilisé ensuite dans de nombreuses applications industrielles. De sa production jusqu'à son stockage et ses différentes utilisations, les élèves seront amenés à découvrir la molécule H_2 sous sa forme gazeuse et liquide. A l'heure des préoccupations environnementales, cette molécule pourrait bien, à terme, jouer un rôle prépondérant dans le paysage énergétique futur.

1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

De tous les éléments chimiques, l'hydrogène est le plus simple. Potentiellement inépuisable et non émetteur de gaz à effet de serre, il n'est pas une source d'énergie mais un "vecteur énergétique" : il doit être produit puis stocké avant d'être utilisé. L'hydrogène pourrait jouer à l'avenir un rôle essentiel dans la transition énergétique en permettant de réguler la production d'électricité produite par les énergies renouvelables intermittentes.

1.1. Production de l'hydrogène

L'hydrogène est produit par la séparation d'éléments chimiques dont l'atome H est un composant et par la mobilisation d'une source d'énergie.

- La principale filière de sa production utilise des composés organiques principalement constitués d'hydrogène et de carbone, comme le gaz naturel, le charbon ou la biomasse.
- La deuxième filière produit de l'hydrogène par décomposition de l'eau. Elle utilise soit un courant électrique pour l'électrolyse, soit une succession de réactions chimiques (cycles thermochimiques) qui permettent de "casser" les molécules d'eau afin d'obtenir de l'hydrogène.
- Une autre filière utilise la lumière du Soleil. Cette méthode de production d'hydrogène est encore au stade de la recherche : des études sont menées en laboratoire pour produire de l'hydrogène grâce à des algues microscopiques ou des bactéries, par photosynthèse.

Plus de 95% de la production d'hydrogène est encore issue d'énergies fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon). On appelle "hydrogène bas carbone" l'hydrogène produit grâce à une source d'énergie renouvelable, nucléaire ou par vaporeformage de gaz naturel si le procédé est associé à une unité de captage, stockage et valorisation du CO_2 (Figure 1).

1.2. Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz dont le volume massique est très important ; il faut donc utiliser différentes techniques pour en stocker des quantités utilisables :

- *S*tockage *à haute pression sous forme gazeuse :* La méthode la plus simple permettant de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression. Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m^3 contre 0,09 kg/m^3 à pression et température normales. Parmi les différentes méthodes, le stockage souterrain en cavités salines lixiviées ou en cavités minées constitue une solution particulièrement intéressante en raison de sa souplesse d'utilisation. De grandes quantités d'hydrogène peuvent être ainsi stockées en toute sécurité à des pressions élevées.

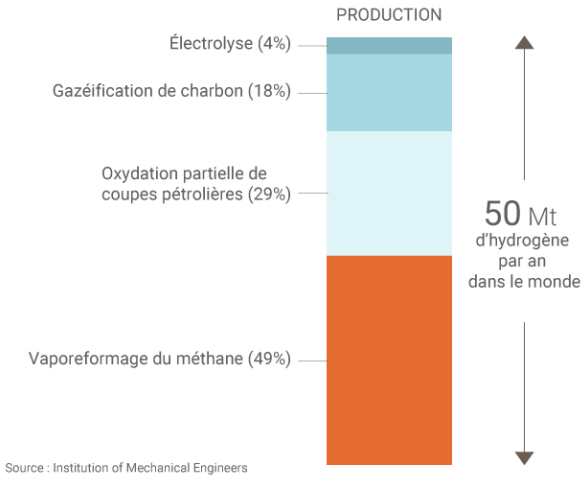

Figure 1 : Différents procédés de production de l'hydrogène

- *Stockage cryogénique sous forme liquide :* Une technique de pointe pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à transformer l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant à très basse température. L'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit. Ainsi, à -252,87°C et 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m^3. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres. Avec une telle quantité d'hydrogène embarquée, un véhicule équipé d'une pile à combustible pourrait parcourir une distance de 500 km en toute autonomie. Afin de pouvoir conserver l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés thermiquement.
- *Stockage massique sous forme d'hydrures :* Le stockage de l'hydrogène sous forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau, est aussi une piste de recherche prometteuse. Les méthodes de stockage sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau. Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates (complexe Al-H). Cependant, une très faible masse d'hydrogène peut être stockée actuellement dans ces matériaux, ce qui représente le principal inconvénient de cette technologie (rapport masse d'hydrogène/masse totale du réservoir de 2 à 3% au maximum).

1.3. Captage, stockage et valorisation du CO_2

La production de l'hydrogène par électrolyse à partir d'une électricité bas carbone fournie par de l'énergie nucléaire ou renouvelable est actuellement beaucoup plus onéreuse que celle du vaporeformage de gaz naturel. Dans une optique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la poursuite de ce dernier mode de production d'hydrogène doit s'accompagner nécessairement de moyens de captage du CO_2 qui est valorisé dans l'industrie ou séquestré dans des aquifères salins profonds.
Historiquement, le CO_2 est utilisé pour la production d'urée (57%) et pour la récupération assistée de pétrole (34%). Le restant (9%) est majoritairement employé pour des applications dans l'agro-alimentaire et la métallurgie (AIE, 2018). Mais avec le déploiement des technologies de captage, de nouvelles voies de valorisation du CO_2 émergent avec des débouchés pour les industriels tels que l'utilisation du CO_2 comme matériaux de construction ou comme substitut de ressources fossiles pour la production de matières plastiques et de carburants synthétiques, etc...

1.4. Marché de l'hydrogène

L'hydrogène en tant que vecteur énergétique peut être utilisé dans de nombreuses applications : la production d'électricité (Power to Power), le transport (Power to Mobility), l'industrie (Power to Industry) et le réseau de gaz naturel (Power to Gaz). La Figure 2 donne une illustration de la filière de l'hydrogène gazeux avec en amont, la production par électrolyse de l'eau, en aval, les quatre applications industrielles et au centre, le stockage en cavités salines.
Dans l'industrie, l'hydrogène est utilisé pour ses propriétés chimiques, en particulier dans les usines d'ammoniac (~50% de la consommation mondiale) et dans les raffineries de pétrole (désulfurisation d'essence et de gazole, production de méthanol…).

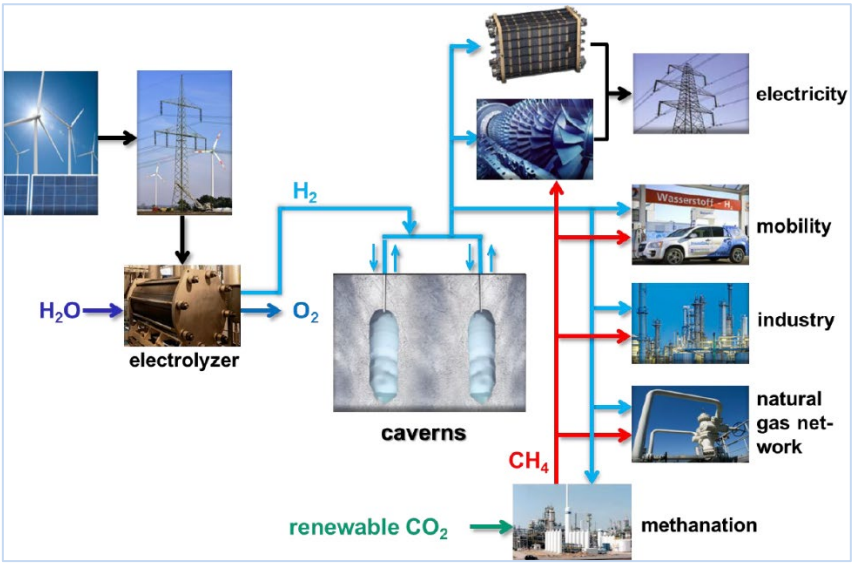

Figure 2 : Filière de l'hydrogène gazeux : production par électrolyse, stockage en cavités salines et domaines d'application (source Solution Mining Research Institute, SMRI)

2. OBJECTIFS ET ORGANISATION

Le MIG se propose d'étudier l'hydrogène sous ses deux formes gazeuse et liquide depuis la phase de production en passant par le transport, le stockage et l'utilisation. Il s'agit de faire une évaluation technicoéconomique comparative, intégrant les normes du développement durable, dans le but de mettre en évidence la filière la plus intéressante à déployer. Compte tenu de l'étendu du sujet, seules les deux applications majeures concernant la mobilité et l'industrie seront considérées.
Le travail commence par l'analyse du contexte général des énergies renouvelables et la place qu'occupe l'hydrogène dans la transition énergétique. Cette analyse permettra de définir les configurations à étudier plus en détail pour chacune des deux applications industrielles envisagées. Le premier volet est technique et concerne la production de l'hydrogène par vaporeformage du gaz naturel et par électrolyse de l'eau, le captage du CO_2, la liquéfaction et le transport de l'hydrogène, le stockage souterrain sous formes gazeuses et liquide, les interactions entre les installations de surface et les structures souterraines et enfin le bilan énergétique de chaque système. Le second volet porte sur les aspects réglementaire, sécuritaire, environnemental, social et économique du projet.

Le MIG sera réalisé en 3 semaines bloquées du lundi 14 novembre au vendredi 02 décembre 2022. La première semaine sera consacrée à l'acquisition des connaissances préalables sur les principaux thèmes à traiter en s'appuyant essentiellement sur des conférences et des visites d'entreprises et de chantiers ainsi que sur les échanges avec les acteurs industriels et institutionnels. Au cours des deux autres semaines, les élèves réaliseront des "mini-projets" dans le but d'appréhender de manière quantifiée la complexité des enjeux et des problèmes posés et de proposer des solutions ou des pistes de réflexion.

2.1 Contenu des mini-projets

Le travail sera organisé autour de 6 mini-projets menés par petits groupes de 5 à 6 élèves qui les amèneront à rassembler les différents éléments de la réflexion en vue d'une synthèse générale.

Mini-projet 1 : H_2 et la transition énergétique

Ce mini-projet commence par décrire le contexte actuel de la transition énergétique et la place de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie. Les données disponibles sur la production, le transport, la liquéfaction, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène dans sa forme gazeuse et liquide seront rassemblées en vue d'établir les configurations à étudier dans le MIG. Une configuration est définie par un besoin d'énergie de l'application considérée (mobilité et/ou industrie) et un cycle d'exploitation de l'hydrogène pouvant être quotidien, hebdomadaire, mensuel voire saisonnier.

Mini-projet 2 : Production, transport et liquéfaction de H_2

Les deux modes de production de l'hydrogène à étudier sont le vaporeformage du gaz naturel avec captage et valorisation du CO_2 ainsi que l'électrolyse de l'eau. Le transport et la liquéfaction de l'hydrogène seront traités en mettant en avant les enjeux et les verrous technologiques et en procédant à une analyse comparative entre les formes gazeuses et liquide de l'hydrogène.

Mini-projet 3 : Stockage gazeux de l'hydrogène en cavités salines lixiviées et en cavités minées

La première tâche dans ce mini-projet consistera à expliquer les raisons du stockage de l'hydrogène gazeux dans ces deux types de réservoirs et les conditions requises dans chaque cas. La création de la cavité par lessivage, dans les formations salines, et par creusement minier, dans les roches compétentes, sera étudiée avec des outils simples d'ingénieurs en utilisant les paramètres établis dans les configurations envisagées. Contrairement à la cavité saline lixiviée qui est parfaitement étanche, la cavité minée nécessite la mise en place d'un revêtement qu'il faut dimensionner pour assurer la stabilité et l'étanchéité du stockage. Les simulations numériques des scénarios d'exploitation des deux types de stockages seront réalisées avec un logiciel dédié développé au centre de Géosciences. Ce logiciel permet d'assurer le couplage entre la thermodynamique de l'hydrogène et le comportement thermomécanique de la roche avec en particulier la prise en compte du fluage du sel. Une analyse comparative des deux types de stockage conclura les simulations effectuées.

Mini-projet 4 : Stockage liquide de l'hydrogène

La très basse température de l'hydrogène liquide impose la conception de réservoir assurant une isolation thermique totale par rapport à l'environnement. Cela peut se faire avec un réservoir à double coques métalliques séparées soit par un vide (réservoir prévu par Airbus pour l'avion hydrogène), soit par un matériau super isolant (réservoir enterré pour une station d'hydrogène liquide, Figure 3). C'est le second type de réservoir qui sera plus étudié avec des simulations numériques thermiques. Pour un stockage massif de l'hydrogène liquide en souterrain, deux options sont possibles : la réalisation d'une cavité minée avec un revêtement permettant à la fois d'assurer la stabilité, l'étanchéité et surtout l'isolation de la roche qui ne supporte pas ce niveau de température. L'autre solution consiste à congeler au préalable les terrains. La faisabilité de ces deux solutions seront examinées en s'appuyant sur les recherches et les expériences acquises dans le stockage du Gaz Naturel Liquéfié (GNL, Figure 3). Des simulations numériques simplifiées pourraient également être mises en œuvre.

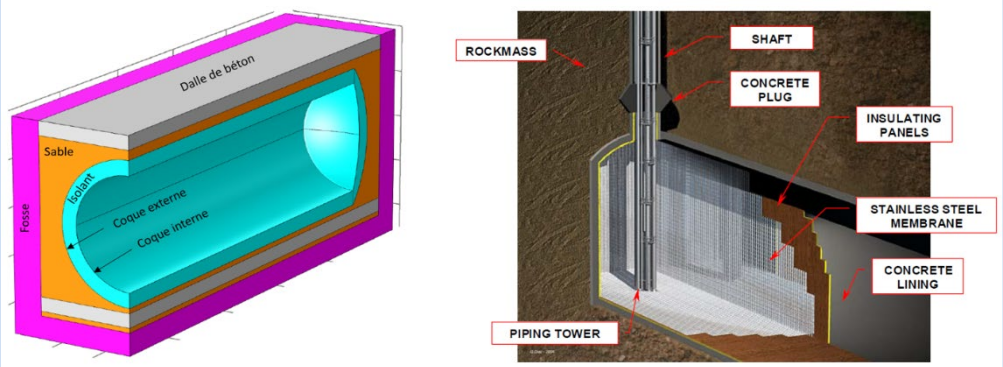

Figure 3 : Stockage de l'hydrogène liquide en réservoir enterré et en cavité minée

Mini-projet 5 : Cadre législatif, environnemental et social

Le volet règlementaire, environnemental et social revêt une importance capitale dans la réussite d'un tel projet. On commencera par rappeler la réglementation liée à ce type d'installation pour mener par la suite une étude sur ses impacts possibles sur l'environnement. Les aspects territoriaux concernant l'usage de l'hydrogène dans ses formes gazeuse et liquide seront pris en compte dans l'analyse globale de l'acceptabilité sociale en comparaison avec le gaz naturel. Pour donner un sens concret à ce projet, des sites potentiels en France seront proposés pour l'implémentation d'une installation d'hydrogène.

Mini-projet 6 : Bilan énergétique et évaluation économique

Un inventaire simplifié des équipements et des procédés à mettre en œuvre en surface sera effectué en relation avec les structures souterraines du stockage dans le but d'établir le bilan énergétique de chaque configuration envisagée. Les résultats obtenus permettront de procéder à l'évaluation économique des différentes configurations et à l'identification de la filière d'hydrogène la plus intéressante à déployer.

2.2. Organisation

La semaine 1 sera consacrée à l'acquisition des connaissances en s'appuyant sur les conférences et les visites effectuées ainsi que les échanges avec les acteurs industriels et institutionnels. Les élèves sont encouragés à poser leurs questions aux conférenciers.

En deuxième semaine, les quatre premières journées seront consacrées aux mini-projets 1 à 3, la dernière, à une synthèse des résultats des travaux réalisés ainsi qu'à la coordination des résultats en vue de la préparation des mini-projets suivants. En troisième semaine, les quatre premières journées seront

consacrées aux mini-projets 4 à 6, et la dernière, à la synthèse des travaux et à la préparation du rapport final du MIG.

Semaine 1

Lundi 14/11 Ecole Paris Les Ulis	- Présentation du MIG - E. El Ahmar & F. Hadj-Hassen - Conférence sur la filière hydrogène – C. Werquin (France Hydrogène) - Visite de la société GTT (Electrolyse)
Mardi 15/11 Ecole Paris Rueil Malmaison	- Conférence sur l'hydrogène et le développement durable – C. Descamps-Large - Recherche documentaire - P. Nalon - Visite de la société Geostock (Ingénierie du stockage)
Mercredi 16/11 Loges en Josas	- Visite du centre de recherche d'Air Liquide (Leader mondial du gaz)
Jeudi 17/11 Etrez	- Visite du site de stockage de gaz en cavités salines de Storengy (Opérateur du stockage souterrain de gaz)
Vendredi 18/11 Stains	- Visite du centre de recherche d'Engie (Groupe mondial du secteur de l'énergie)

Semaine 2

Lundi 21/11 Fontainebleau	Réalisation des mini-projets 1 à 3 menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 22/11 Fontainebleau	
Mercredi 23/11 Fontainebleau	
Jeudi 24/11 Fontainebleau	
Vendredi 25/11 Fontainebleau	Synthèse des mini-projets 1 à 3 et restitution Coordination des résultats en vue des mini-projets 4 à 6.

Semaine 3

Lundi 28/11 Fontainebleau	Réalisation des mini-projets 4 à 6 menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 29/11 Fontainebleau	
Mercredi 30/11 Fontainebleau	
Jeudi 01/12 Fontainebleau	
Vendredi 02/12 Paris	Synthèse des mini-projets 4 à 6 et restitution Préparation du plan du rapport final

2.3. Références

https://www.airliquide.com/fr/groupe/activites/hydrogene
https://www.geostockgroup.com/
https://www.youtube.com/user/storengycom/videos
https://www.engie.fr/hydrogene/

2.4. Contacts

☞ **Dr. Elise El Ahmar**
Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines Paris
e-mail : elise.el_ahmar@minesparis.psl.eu
Portable : + 33 6 88 08 58 81

☞ **Dr. Faouzi Hadj-Hassen**
Centre de Géosciences – Mines Paris
e-mail : faouzi.hadj_hassen@minesparis.psl.eu
Portable : + 33 6 76 10 35 92

OPTIM AÉRONAUTIQUE

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur :** Vincent Maurel
- **Encadrants :** Aurélie Girou (Safran), Sylvain Depinoy, Pierre Arnaud, Basile Marchand (Mines Paris)
- **Centres de recherche concernés :** Centre des Matériaux (MAT),
- **Lieux :** Evry (91), Safran : Villaroche (77), Gennevilliers (92), Ariane Group : Vernon (27), Airbus et DGA : Toulouse (31)

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

L'industrie aéronautique civile est un secteur en continuelle croissance depuis que l'avion a commencé à devenir un mode de transport populaire dans les années 1960. Le nombre de voyageurs ne cesse de croître à un rythme élevé (les estimations « pessimistes » évoquent un doublement du nombre de passagers entre 2010 et 2030 !) avec une très grande diversification des enjeux associés.

En effet, non seulement le trafic va s'intensifier vers les pays en voie de développement, modifiant au passage le type d'avion et de missions, mais en outre le nombre de concurrents augmente dans une logique globale de diminution des coûts pour les clients (passager ou fret) et de diminution de l'emprunte environnementale.

Le secteur voit donc se développer une compétition acharnée dans les domaines du développement et de l'optimisation des aéronefs et de leur motorisation, de la diminution de la consommation d'hydrocarbures, de l'amélioration de la fiabilité et de la prévision de la durée de vie des pièces, de la diminution globale des coûts et en particulier d'une offre de maintenance renouvelée.

De plus, cet ensemble est régi par une exigence de sécurité accrue. On peut mesurer un des enjeux technologiques au prisme des échelles mises en jeu dans un aéronef, où l'ensemble des critères précédents doit être optimisé à l'échelle de plusieurs dizaines de mètres (la cellule) jusqu'à quelques microns (ici un revêtement protecteur pour une aube de turbine), Fig1.

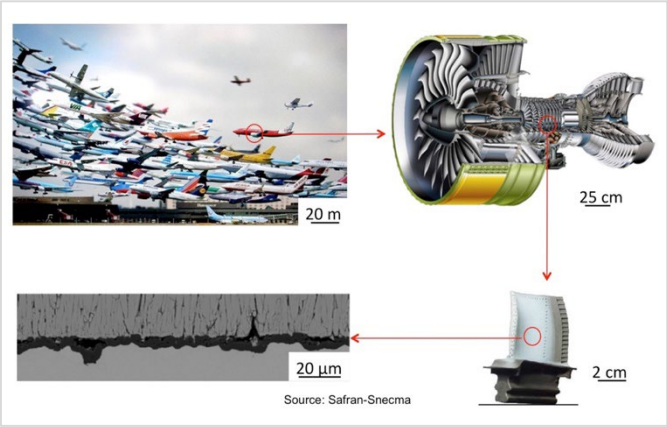

Fig. 1 : du mètre au micron

La prise de conscience des risques associés au réchauffement climatique impose de revoir globalement la stratégie de conception aéronautique d'abord d'un point de vue technique et parallèlement en revoyant en profondeur les modalités de transport possibles dans un futur proche (autonomie, variabilité de la taille des aéronefs).

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

Ce MIG a pour objectif d'aborder les enjeux technico-économiques associés à l'optimisation globale et à la fiabilisation des aéronefs, avions ou lanceurs fusées pour les technologies actuelles comme pour des technologies en rupture d'un point de vue technique comme d'un point de vue des usages des aéronefs. Nous nous intéresserons notamment aux enjeux associés aux changements d'échelles (du laboratoire aux composants industriels), en détaillant la démarche de conception et de développement des pièces de turbomachines développées par SAFRAN en s'appuyant sur les démarches expérimentales, ainsi que l'analyse et la modélisation de la durée de vie associée. Ces stratégies de développement sont aujourd'hui enrichies par un recours intensif sinon aux bases de données au moins aux techniques de calcul avancées qui bouleversent les méthodes (big data, machine learning).

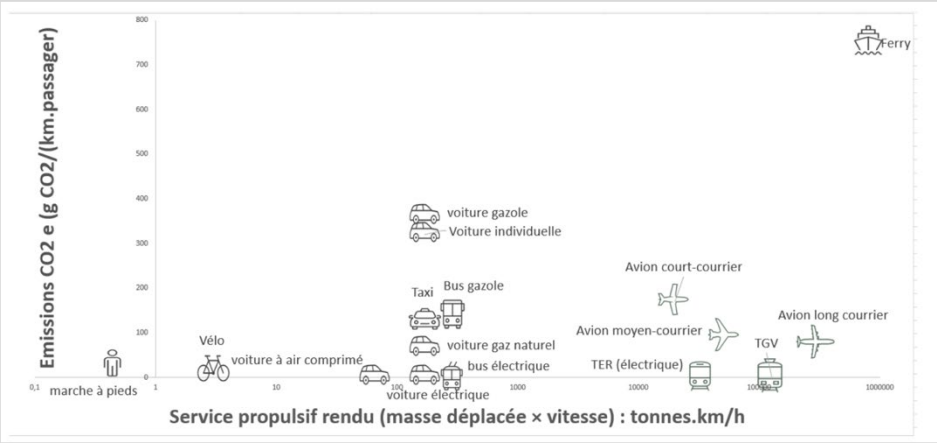

Fig. 2 : quel service pour quelles émissions de CO2?

Ce thème allie la gestion du risque en termes techniques (fiabilité des pièces) mais également en termes sociologiques (acceptation du risque, emprunte environnementale). Les nouveaux enjeux du secteur seront analysés tant pour l'avion du futur (électrique, hybride) que pour les technologies de procédé émergeantes. Par exemple on tiendra compte de l'apport de l'optimisation énergétique globale d'un aéronef sur la chaine de conception, en s'appuyant sur le choix optimal de mode de propulsion, Fig. 2, et le choix de carburant.

MINI-PROJETS

Les thèmes des mini-projets proposés seront :

- Le **choix des technologies de propulsion** pour augmenter le rendement énergétique des aéronefs en tenant compte des contraintes environnementales et des choix de société

- La **modélisation numérique** des propriétés mécaniques (comportement et endommagement) en fonction de l'évolution des microstructures dans les conditions réelles d'utilisation

- Les méthodes de **conception** de pièces, de **choix de matériaux** et de leur optimisation pour l'allégement des structures et l'augmentation des performances.

- La **caractérisation** métallurgique des matériaux aéronautique et les essais mécaniques

effectués sur des échantillons de faible dimension (fatigue à haute température, comportement…) et la simulation expérimentale des conditions de chargement en service (hautes températures, érosion, gradients...)

- Les méthodologies d'analyse des **modes de défaillance** de pièces de structure

- L'argumentation scientifique et la confrontation idéologique, la transmission du savoir

LES VISITES

Du 14 au 22 novembre : Visite de sites techniques et industriels : forges, fonderies, essais à toutes les échelles (de l'éprouvette à l'avion complet !), chaînes de montage de moteurs aéronautiques et de moteurs fusées, analyse d'accident (BEA).
Safran Aircraft Engine, fonderie et forge de Gennevilliers, usine de montage et banc d'essai de Villaroche, Ariane Group (Vernon, Eure), DGA Techniques aéronautiques, Airbus, BEA Le Bourget

PROGRAMME PREVISIONNEL

Du 23 novembre au 2 décembre 2022 : Mini-projets et synthèse

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Vincent Maurel, Mines ParisTech vincent.maurel@mines-paristech.fr

☞ Une copie du passeport (ou CNI pour les ressortissants français) est indispensable avant le 14 octobre 2022

LUTTER CONTRE LA DOULEUR, EN VILLE ET A L'HOPITAL

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur :** daniel.abergel@ens.psl.eu,
- **Encadrants :** frederic.kletz@mines-paristech.fr, daniel.abergel@ens.psl.eu, alain.bessis@ens.psl.eu
- **Centre de recherche concerné :** centre de gestion scientifique (CGS)
- **Lieux :** Paris

RESUME

La douleur chronique représente un phénomène de société aux implications éthiques et morales, aussi bien qu'économiques et sociales. On estime qu'au moins 12 millions de Français souffrent de douleurs chroniques, dont 70% ne reçoivent pas de traitement approprié. La douleur constitue en outre le premier motif de consultation, dans les services d'urgences et chez le médecin généraliste et touche en particulier les populations les plus vulnérables. Si des structures spécifiques de prise en charge existent, seuls 3 % des patients douloureux en bénéficient.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

La douleur, composante ubiquitaire en médecine, se retrouve dans un éventail très large de maladies et on estime à 22 millions en France le nombre de patients souffrant de douleurs chroniques. Ce n'est que depuis une période relativement récente – quelques décennies - que ce symptôme fait l'objet d'une attention et de soins spécifiques et que des structures spécialisées (Centres d'étude et de traitement de la douleur ou CETD) se sont progressivement mises en place afin de prendre en charge les patients souffrant de douleurs chroniques rebelles, dans une approche multidimensionnelle et pluri-professionnelle. Ainsi, des prises en charges différentes selon l'origine et la nature des symptômes douloureux peuvent y être entreprises. Entre 1998 et 2010, trois plans nationaux de lutte contre la douleur se sont ainsi succédé, avec le développement de mesures portant sur des axes multiples et complémentaires (prise en charge, thérapeutique, formation, recherche…). Toutefois, un quatrième plan douleur, attendu pour 2011, n'a jamais vu le jour.

En dehors des répercussions sur la santé et le bien-être des patients, il est important de prendre en compte les conséquences économiques, liées entre autres aux soins et au retentissement sur l'activité professionnelle, de ces douleurs chroniques.
Une prise en charge parfois lourde et nécessitant des connaissances et compétences spécifiques, des parcours des patients divers, font de la douleur une question de santé complexe.

Les défis à relever, exposés dans un « Livre blanc de la douleur publié il y a quelques années par la SFETD (Société d'étude et de traitement de la douleur), sont nombreux : il s'agit de consolider pour les pérenniser les « Structures douleur chroniques » SDC dédiées, de former tous les professionnels de santé à la prose en charge de la douleur ; impliquer les « acteurs de premier recours », médecins et pharmaciens. Mais il s'agit également des aspects de prévention, du statut

et de la reconnaissance des approches non médicamenteuses, du soutien des personnes douloureuses et de leurs proches.

Dans un contexte économique tendu, avec en particulier une démographie médicale marquée par de nombreux départs à la retraite non remplacés dans les prochaines années, la question de l'avenir de la prise en charge efficiente de la douleur ou de la pérennité des structures spécialisées se pose.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

Les objectifs sont introduits dans le paragraphe « mini-projets ».
La première semaine du MIG comportera essentiellement des conférences par divers intervenants, acteurs du domaine, qui vous permettront de couvrir l'essentiel du champ de l'étude.
La seconde semaine du MIG sera consacrée à l'approfondissement des divers aspects soulevés par les intervenants. Le travail s'effectuera en différents sous-groupes chargés chacun, après une réflexion commune permettant la problématisation des questions, d'une sous-thématique particulière, sous forme de mini-projets. Enfin, la troisième semaine sera le temps de la mise en forme de ces mini-projets, au cours de laquelle les sous-groupes contribueront ensemble à proposer des solutions concrètement envisageables. Ce travail vous permettra de mettre en valeur l'approche de l'ingénieur dans la résolution de ces problèmes complexes.

MINI-PROJETS

Il faudra au cours de ce travail bien comprendre les enjeux de la problématique « douleur » en santé. Plus concrètement, cela nécessitera de comprendre les objectifs thérapeutiques d'un CETD, son mode de fonctionnement et ses variations en fonctions des spécificités des pathologies prises en charge, mais éventuellement aussi, si cela est pertinent, de la structure qui l'accueille, de son implantation géographique, etc. Il faudra saisir et analyser les difficultés auxquelles ces centres sont confrontés (files d'attente de patients, formation des personnels, rémunérations des actes, …). Il conviendra également de bien saisir la notion de parcours de soins, en comprendre les différents aspects et en identifier les points critiques, notamment ceux qui nécessitent amélioration. Il s'agira également de faire le point sur les capacités de prise en charge de la douleur, les difficultés spécifiques rencontrées, les questions relatives aux liens entre prise en charge de ville et à l'hôpital, c'est-à-dire l'interface ville-hôpital. Il conviendra d'identifier les aspects strictement médicaux et ceux liés aux structures de soins, et bien évidemment de prendre en compte les dimensions humaines et sociales.

Ces minis-projets pourront inclure les réponses aux points suivants (liste non exhaustive, que vous devrez éventuellement modifier selon vos analyses et recherches) :

- Comprendre les spécificités du traitement et de la prise en charge de la douleur ;
- Identifier les différents parcours de soins des patients, les liens ville-hôpital ;
- Appréhender les dimensions humaine, sociale, économique ;
- Identifier les acteurs-clefs du domaine et leurs rôles effectifs ou potentiels ;
- Analyser le fonctionnement des dispositifs de prise en charge de la douleur dans un (ou plusieurs) CETD.
- Identifier les points faibles et les difficultés éventuelles de fonctionnement. Quelles en sont l'efficacité et les limites ?
- Proposer une analyse et une évaluation du dispositif de prise en charge de la douleur par les CETD, son apport et son efficacité pour le suivi des patients
- Quelles propositions pour améliorer les points critiques et qu'en attendez-vous et quels critères pour en évaluer l'efficacité, y compris économique ?

- Quelle place pour les outils numériques accessibles ou en développement aujourd'hui ? En quoi pourraient- (peuvent)-ils participer à la démocratie sanitaire ?

LES VISITES

Le MIG SANTE se décomposera globalement en trois étapes. Au cours de la première semaine, vous effectuerez diverses visites et interviews et assisterez à un cycle de présentations par les différents acteurs des domaines impliqués par ces questions. La seconde sera consacrée à l'approfondissement des différentes questions, réparties en différents sous-groupes, comprenant notamment l'acquisition de données pour le mini-projet. Enfin, la troisième semaine sera le temps de la mise en forme du mini-projet, s'attachera à proposer des solutions concrètement envisageables et mettra en valeur l'approche de l'ingénieur dans la résolution de ces problèmes complexes. Le programme détaillé et le calendrier des conférences et visites vous sera communiqué ultérieurement.

PROGRAMME PREVISIONNEL

Le programme complet vous sera communiqué ultérieurement. Le panel d'intervenants (une dizaine) comprendra des médecins cliniciens, responsables de centres anti-douleur de différentes spécialités (y compris pédiatrique), mais aussi des médecins spécialistes de la question de la prise en charge de la douleur en ville, ou encore de représentants d'acteurs institutionnels (Haute Autorité de Santé, Direction générale de l'offre de soins – DGOS) et d'associations de patients.

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Contact : Daniel Abergel
Tél. : 01 44 32 32 65
Email : daniel.abergel@ens.psl.eu

DETECTION PAR SATELLITE DES POLLUTIONS PLASTIQUES EN MER

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur :** Sébastien Travadel
- **Encadrants :** Franck Guarnieri, Luca Istrate, Philippe Blanc, Manon Nagy (3A)
- **Centres de recherche concernés :** CRC et OIE
- **Lieu :** Sophia Antipolis

RESUME

Les découvertes récentes en biologie marine ont révélé les effets catastrophiques sur le vivant et le climat de la pollution de l'Océan par les plastiques. Pour autant, la cartographie précise de cette pollution demeure limitée. Le recours aux satellites paraît une piste intéressante, mais la mise au point d'algorithmes de détection automatique de déchets à l'aide d'apprentissage statistique requiert des bases de données d'images importantes. Pour pallier le manque de mesures *in situ*, il est proposé aux élèves du MIG OCEAN, en collaboration avec le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et la Fondation Tara Océan, de développer un simulateur d'images satellite de la constellation très haute-résolution Pléiades, d'entraîner des algorithmes de segmentation sur ces images synthétiques, puis de mesurer leur performance sur des images réelles de cibles macro-plastiques immergées en mer Méditerranée. Il s'agit ainsi d'évaluer dans quelle mesure un tel outil pourrait aboutir à une cartographie en temps réel à destination des décideurs publics.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Les océanographes ont démontré les impacts considérables des plastiques en décomposition sur le milieu marin : contamination de l'ensemble de la chaîne trophique, bouleversement des équilibres entre espèces et, plus récemment, dérèglement de la « pompe à carbone » - ce gigantesque mécanisme par lequel l'Océan absorbe plus de 30% du CO2 anthropique.

La quantification et le suivi précis de cette pollution demeurent toutefois problématiques à l'échelle des espaces maritimes. L'utilisation conjointe d'images satellite civiles, qui couvrent de larges régions jusqu'à des résolutions de quelques dizaines de centimètres, et d'algorithmes de détection à base d'apprentissage statistique (*Machine Learning*), pourrait offrir une solution efficace, du moins pour les macro-plastiques.

Si les algorithmes de *Machine Learning* ont montré leur performance pour segmenter des images, leur entraînement pour discriminer spécifiquement les déchets plastiques d'autres objets ou de l'eau nécessite des volumes significatifs de données qualifiées. Or, la disponibilité limitée des constellations de satellites et la difficulté à valider la nature des débris flottants rendent impossible une collecte de données à grande échelle. Afin de dépasser cette limitation, les centres de recherche CRC et OIE de Mines Paris ont développé un simulateur d'images des satellites Sentinel 2 (10 m de résolution), qui a montré des résultats prometteurs.

En partenariat avec le CNES et la Fondation Tara Océan, le MIG OCEAN vise à tester une démarche similaire sur les images de la constellation très haute résolution Pléiades (50 à 70 cm de résolution). La simulation d'images à très haute résolution s'avère complexe puisqu'elle doit intégrer notamment la réfraction par les vagues de la lumière du Soleil.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure une cartographie de la pollution de l'Océan par les macro-plastiques pourrait être mise à disposition des décideurs publics à partir des images de la constellation Pléiades. Dans cette perspective, les élèves devront s'organiser pour, collectivement :

- réaliser (en Python) un simulateur d'images Pléiades et générer un jeu massif d'images synthétiques contenant divers débris flottants ;
- entraîner des algorithmes d'apprentissage statistique sur ces données ;
- tester leur performance sur des images inédites de cibles plastiques immergées, acquises en juin 2022 dans le cadre d'une collaboration entre Mines Paris, l'Université de la mer Egée, le CNES, et Airbus Defence & Space ;
- dresser les grandes lignes d'un outil à l'usage des décideurs publics qui pourrait être rendu disponible à moyen terme (~2 ans) dans le cadre d'un partenariat avec le CNES.

MINI-PROJETS

Les élèves se répartiront en mini-groupes pour développer l'ensemble des fonctionnalités du simulateur d'images, puis entraîner et tester des algorithmes d'apprentissage statistique. Cela inclut : la modélisation de l'optique et du traitement du signal par les instruments de mesure du satellite ; la modélisation de la réfraction par les vagues de la lumière du Soleil ; l'entraînement de plusieurs familles d'algorithmes d'apprentissage ; le test de ces algorithmes sur des images réelles inédites ; l'optimisation du code et l'intégration en une chaîne complète. Par ailleurs, tous les élèves devront contribuer à la revue de littérature sur les sources et les effets des pollutions plastiques, ainsi qu'à la documentation du code et la rédaction d'un premier jet du rapport final. Une présentation des résultats sera organisée le vendredi 2 au matin devant des experts du CNES, de Tara Océan, de la société ACRI et de l'Institut Océanographique de Monaco.

LES VISITES

Deux visites sont prévues, au cours desquelles une conférence par des experts sera donnée :

- le site toulonnais de l'IFREMER, où seront présentés la flotte océanographique et ses missions ainsi que les travaux de l'institut sur la détection des pollutions ;
- le site de fabrication des satellites de Thalès Alenia Space (Cannes), où des ingénieurs présenteront les caractéristiques des satellites de la constellation Pléiades et les grands principes de l'imagerie satellite.

Par ailleurs, trois conférences seront organisées sur Sophia Antipolis :

- le CNES présentera l'utilisation de Pléiades et l'écosystème dans lequel un service de détection des plastiques en mer pourrait s'inscrire à terme ;
- la Fondation Tara Océan présentera son activité ainsi qu'un état des lieux des pollutions des océans par les plastiques et leurs conséquences sur le vivant et le climat.

PROGRAMME PREVISIONNEL

<table>
<tr><th>Date</th><th colspan="2">Matin</th><th>Après-midi</th></tr>
<tr><td>Dimanche 13</td><td colspan="2"></td><td>Arrivée à Toulon</td></tr>
<tr><td>Lundi 14</td><td colspan="2">Visite de l'IFREMER (flotte océanographique)</td><td>Présentation des travaux de l'IFREMER sur la détection des pollutions. Déplacement sur Sophia Antipolis en fin de journée</td></tr>
<tr><td>Mardi 15</td><td colspan="2">Présentation par Tara Océan de l'état des connaissances sur la pollution des océans par les plastiques</td><td>Présentation par le CNES de la constellation Pléiades et des services associés</td></tr>
<tr><td>Mercredi 16</td><td colspan="2">Visite de Thalès Alenia Space et introduction aux modèles d'acquisition d'images satellite</td><td>Introduction à la constitution des plastiques et des processus physico-chimiques de leur dégradation</td></tr>
<tr><td>Jeudi 17</td><td colspan="2">Crash-course d'ingénierie logicielle (Python)</td><td>Travaux pratiques en Python (structures de données, performance d'algorithmes de traitement d'images)</td></tr>
<tr><td>Vendredi 18</td><td>Méthode bibliographique</td><td>Organisation et prise en main de l'environnement</td><td>Première analyse des images satellite de cibles plastiques (campagne de juin 2022)</td></tr>
<tr><td>Lundi 21</td><td colspan="3" rowspan="5">Projet</td></tr>
<tr><td>Mardi 22</td></tr>
<tr><td>Mercredi 23</td></tr>
<tr><td>Jeudi 24</td></tr>
<tr><td>Vendredi 25</td></tr>
<tr><td>Lundi 28</td><td colspan="3" rowspan="3">Projet</td></tr>
<tr><td>Mardi 29</td></tr>
<tr><td>Mercredi 30</td></tr>
<tr><td>Jeudi 1er</td><td colspan="2">Préparation du rendu final (rapport et code)</td><td>Préparation des présentations</td></tr>
<tr><td>Vendredi 2</td><td colspan="2">Présentation des travaux devant des experts</td><td>Présentation des séquences MIG sur Sophia</td></tr>
</table>

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Le transport vers Toulon s'effectuera en train dans la journée du dimanche 13 novembre. Le transfert sur Sophia le 14 sera assuré en minibus. Le retour sur Paris le 2 décembre s'effectuera en train de nuit. Les élèves seront hébergés sur Sophia en binôme (appartements de 2 pièces), dans une résidence commune à l'ensemble des migs sophipolitains. Pour tout renseignement complémentaire, contacter Sébastien Travadel :

Mail : sebastien.travadel@minesparis.psl.eu
Tél : 06 74 93 17 25

L'HYDROGENE DANS LA REGION PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur :** Pedro AFFONSO NOBREGA
- **Encadrants :** Pedro AFFONSO NOBREGA, Anaëlle JODRY, Robin GIRARD
- **Centre de recherche concerné :** PERSEE
- **Lieux :** Sophia-Antipolis

RESUME

Dans un contexte de lutte contre le changement climatique, l'hydrogène est appelé à jouer un rôle clé. La région Provence-Alpes-Côte d'Azur a lancé en décembre 2020 son Plan Régional Hydrogène afin de soutenir la filière hydrogène dans la Région, décarboner les usages actuels de l'hydrogène dans l'industrie et promouvoir son utilisation en tant que vecteur énergétique, notamment pour la mobilité lourde. Néanmoins, les questions qui se posent sont : D'où viendra cet hydrogène ? A partir de quelles sources d'énergie et où sera-t-il produit ? Comment sera-t-il transporté, stocké et distribué ? Quels seront les coûts et les impacts environnementaux et sociétaux du déploiement de l'hydrogène dans la région ? La réponse à ces questions dépend fortement des spécificités de chaque territoire. L'objectif de ce MIG sera ainsi d'étudier et d'évaluer le déploiement de l'hydrogène dans différents territoires de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur : un bassin portuaire-industriel, une zone urbaine densément peuplée, une zone de montagne à vocation touristique ou encore une agglomération disposant d'un site de stockage en cavités salines et un fort potentiel photovoltaïque.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Dans un contexte de lutte contre le changement climatique, l'hydrogène est appelé à jouer un rôle clé.

Aujourd'hui, l'hydrogène est utilisé essentiellement comme un composant chimique dans l'industrie (raffinage, production d'ammoniac, etc.). Cet hydrogène est produit à partir de sources fossiles (gaz naturel ou charbon, notamment), la voie la plus mature et économique, mais avec des fortes émissions de CO_2 associées. Il est donc nécessaire de remplacer cet hydrogène fossile par un hydrogène issu de sources d'énergie renouvelables ou bas carbone (via l'électrolyse de l'eau notamment), ou bien mettre en place une capture et un stockage du CO_2, pour autant que la pertinence technique, économique et écologique de cette voie soit démontrée.

Par ailleurs, l'hydrogène est vu comme un vecteur énergétique important pour le futur. D'une part, il peut permettre la décarbonation de secteurs dont les émissions de CO2 seraient difficiles à diminuer autrement (sidérurgie, mobilité terrestre lourde, sites isolés, aviation, transport maritime...). D'autre part, il peut favoriser le déploiement de sources d'électricité renouvelables via le stockage saisonnier, la flexibilité (dans le temps et dans l'espace) et le couplage avec les réseaux de gaz.

Ainsi, en Septembre 2020, la France a présenté sa stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné, avec trois priorités : décarboner l'industrie en faisant émerger une filière française de l'électrolyse, développer l'hydrogène décarboné pour la mobilité lourde et soutenir la recherche, l'innovation et la formation dans ces domaines.

En décembre 2020, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur a présenté le Plan Régional Hydrogène afin de soutenir la filière H2 dans la région, qui abrite des grands consommateurs d'hydrogène dans le bassin industriel de Fos-sur-Mer, un certain nombre de projets démonstrateurs (Jupiter 1000) ou en développement (Hynomed, Hyammed, Hygreen Provence, …) et un fort potentiel de production d'électricité –solaire ou éolienne, notamment offshore. Le Plan Régional fixe des objectifs chiffrés pour 2027 et 2032 pour la décarbonation de l'industrie, de la mobilité et la production d'hydrogène "renouvelable & bas carbone".

Néanmoins, le plein développement de l'hydrogène ne se fera qu'à plus long terme, sur l'horizon 2040-2050. Les questions qui peuvent se poser sont : quel sera le coût de ce développement ? Et pour quels gains environnementaux ? Donner des réponses est d'autant moins simple que les performances et les coûts des différentes technologies évoluent vite (non seulement pour l'hydrogène, mais aussi pour ses concurrents tels que les batteries), que les taux de pénétration des différentes technologies sont difficiles à prévoir et que la pertinence de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique est fortement dépendante des spécificités de chaque territoire. De plus le déploiement d'une technologie n'est possible que si elle est acceptée au niveau humain, notamment sur le sujet des risques liés à la technologie (inflammabilité, explosion, …).

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

L'objectif de ce MIG sera d'étudier l'évolution de la demande d'hydrogène dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur dans un contexte de décarbonation de l'industrie et de transition énergétique.
Cette démarche se basera sur un outil (développé en Python) permettant de faire des analyses de sensibilité par rapport à différents paramètres (taux de pénétration, coûts des technologies, origine de l'hydrogène, stratégie de déploiement des infrastructures...) et scénarios. Les élèves devront :

- Découvrir la filière hydrogène, de la production aux usages, en passant par l'infrastructure de stockage, transport et distribution.
- S'approprier de l'outil numérique et si nécessaire y ajouter des fonctionnalités ;
- Collecter des données associées au territoire de la Région SUD, à son système énergétique et à la filière hydrogène et nécessaires à une modélisation du territoire ;
- Établir des scénarios au niveau régional à partir des scénarios au niveau national (RTE, ADEME…) et/ou international (IEA) et en concertation avec le Chargé de Mission Hydrogène de la Région SUD.
- Comparer les différents scénarios envisagés dans une perspective de transition énergétique et lutte contre le changement climatique.

MINI-PROJETS

Les élèves seront répartis en groupes de 3-4 et chaque groupe essayera de répondre à une question particulière :

Demande : Quelle place de l'hydrogène dans le transport/mobilité et sous quelles conditions ? Quels scénarios pour l'évolution de l'industrie ?

ACV : Quels impacts d'un écosystème H2 ? GES, biodiversité, etc. ? Quels gains par rapport à d'autres alternatives ?

Production : Comment va être produit l'hydrogène ? Vers une production d'hydrogène centralisée ou distribuée ? Quelle part d'importation ?

Logistique : Quelles infrastructures nécessaires ? Stockage, transport, distribution, terminaux d'importation ?

Les élèves pourront également se repartir sur des thèmes transverses tels que la production d'hydrogène, son transport, son stockage, la mobilité ou le bâtiment.

LES VISITES

Centre PERSEE (Sophia-Antipolis) : Visite de l'unité pilote de craquage du méthane par voie plasma et du Laboratoire Pile à Combustible.

Région SUD (Marseille) : Présentation du Plan Régional H2.et discussion avec le Chargé de Mission Hydrogène de la Région.

Capenergies (Aix-en-Provence) : Pôle de compétitivité des filières énergétiques, panorama des projets H2 en cours/à venir dans la région.

Arcelor Mittal (Fos-sur-Mer) : Visite de l'aciérie.

Provence Grand Large (Fos-sur-Mer) : Visite du chantier d'assemblage d'éoliennes flottantes.

Helion (Aix-en-Provence) : Visite du fabricant de piles à combustible forte puissance.

D'autres visites sont en cours de discussion…

PROGRAMME PREVISIONNEL

14/11 au 17/11 – Visites autour de la zone de Fos-Aix-Marseille.

18/11 au 2/12 – Travail sur les mini-projets à Sophia-Antipolis, conférences (Filière H2, mobilité électrique, etc.)

1/12 – Présentation des résultats obtenus à la Région.

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Vous prendrez le TGV à 06h39 à Paris Gare de Lyon direction Marseille. Nous serons basés dans la zone de Fos pour quatre jours de visites aux alentours. Nous rejoindrons ensuite Sophia-Antipolis, où vous serez logés dans une résidence étudiante reliée au site de l'Ecole par une ligne de bus régulière. Vous serez logés en appartements de 2 à 4 personnes, draps et serviettes seront fournies, et les appartements sont équipés d'une cuisine. Le retour se fera en train de nuit le soir du vendredi 2/12.

Contact : pedro.affonso_nobrega@minesparis.psl.eu

METHODES D'EXTRACTION ALTERNATIVES D'URANIUM : COMPARAISON ENTRE LES APPROCHES *BORE HOLE MINING* ET *IN SITU RECOVERY*

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateurs :** Nicolas Seigneur, Damien Goetz
- **Encadrants :** Faouzi Hadj-Hassen, Emmanuel Ledoux, Louis Raimbault
- **Centres de recherche concernés :** Centre de Géosciences
- **Lieux :** Fontainebleau & Paris

RESUME

Durant ce MIG, les élèves mèneront une réflexion comparative de différentes techniques minières. Cette comparaison se basera sur la faisabilité technique et la rentabilité économique et intègrera également les impacts environnementaux, sociaux et climatiques de ses exploitations. Pour rendre cette étude concrète, cette réflexion sera menée en partenariat avec Orano sur un gisement identifié d'uranium du bassin de l'Athabasca. Deux techniques minières seront étudiées par des outils de modélisation afin de simuler la récupération d'uranium : le *Bore Hole Mining* (BHM) et l'*In Situ Recovery* (ISR).

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Comme reconnu par le GIEC, la production nucléaire d'électricité constitue un levier important pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, la production d'uranium, majoritairement assurée par la Russie et ses pays affiliés, est menacée par la crise en Ukraine. Afin d'assurer l'approvisionnement en uranium, de nouvelles techniques minières sont à l'étude pour exploiter de nouveaux gisements.

L'exploitation mondiale d'uranium se base en majorité sur la technique d'*In Situ Recovery* (ISR), tandis que certaines mines traditionnelles (mines à ciel ouvert et/ou travaux miniers souterrains) occupent une part minoritaire dans la production d'uranium. D'autres techniques d'exploitation alternatives sont aujourd'hui à l'étude, comme le *Bore Hole Mining* (BHM), qui offre de nouvelles opportunités d'exploitation de gisements jusqu'ici peu viables économiquement. Le BHM est une technique qui se base sur l'abattage de la roche par un jet d'eau à haute pression. La roche fragmentée est ensuite pompée vers la surface via *airlift*.

La technique ISR se base sur la circulation de solutions lessivantes au sein du gisement. Ces solutions sont injectées au sein du gisement et mobilisent l'uranium avant d'être repompées en surface, où l'uranium est récupéré. Orano opère plusieurs gisements d'uranium via la technique ISR. En particulier, les opérateurs miniers du Kazakhstan utilisent un logiciel de transport réactif développé par le Centre de Géosciences (Hytec) en tant qu'aide à la décision pour l'exploitation du gisement. Hytec est également utilisé pour prédire l'impact environnemental associé à leurs activités, ce qui permet d'apporter une vision globale économique d'une exploitation ISR.

Aujourd'hui, Orano souhaite exploiter un gisement d'uranium du bassin de l'Athabasca (Canada). Sur base de l'expertise en BHM et ISR, Orano se pose la question de quelle est la technique la plus adaptée à ce gisement. Le but de ce MIG est de fournir une approche multi-critères (technique, économique, géologique, environnementale et climatique) pour aider à la décision de la technique minière la plus adaptée pour ce gisement.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

Ce MIG a deux objectifs principaux. Le premier consiste à mettre au point une approche de modélisation multi-physique pour prédire la récupération d'uranium par les deux techniques minières. Le deuxième objectif principal sera de réaliser une analyse multi-critère (économique, technique, environnementale et climatique) pour déterminer, en fonction du type de gisement, la méthode d'extraction la plus adaptée. Pour atteindre ces objectifs, les élèves seront séparés en 3 groupes de travail pour étudier le gisement, et modéliser les deux techniques durant la seconde semaine. Ensuite, les groupes seront remaniés afin de réaliser la comparaison des techniques sur base de leur productivité, impacts environnementaux et leur intensité CO_2. Les résultats de cette comparaison serviront de recommandation qui sera fournie à Orano afin de l'aider dans sa décision quant à la méthode d'extraction la plus adaptée.

MINI-PROJETS (MP)

MP1 – Géologie du Bassin de l'Athabasca et focus sur le gisement d'intérêt. (4 étudiants)

Le but de ce mini-projet est de fournir une description du gisement qui sera exploitée lors de la seconde semaine. Le mini-projet devra travailler en parallèle avec les MP2 & 3 pour déterminer les paramètres hydrologiques (porosité, perméabilité), géochimiques (chimie des eaux), minéralogiques (teneurs) et géotechniques (résistance mécanique) afin de contraindre ces modèles pour leur application au gisement considéré.

MP2 – Description d'un modèle ISR (6 étudiants)

Le but de ce mini-projet est de construire un modèle de transport réactif qui sera appliqué au gisement d'intérêt (en utilisant le logiciel de transport réactif développé par le centre de Géosciences : Hytec). Pour ce faire, les étudiants devront réaliser un modèle hydrogéochimique représentatif des réactions en jeu lors d'une exploitation ISR. Ce modèle devra être capable, une fois appliqué au gisement, de prédire les quantités de lixiviants à injecter ainsi que les quantités d'uranium produites, de manière à estimer l'efficacité d'une exploitation ISR.

MP3 – Elaboration et utilisation d'un modèle Bore Hole Mining (6 étudiants)

Le but de ce mini-projet est de modéliser le processus d'abattage au jet d'eau à haute pression et la formation de la cavité. Ce modèle tentera de reproduire les formes des cavités engendrées par le jetting ainsi que la productivité de la méthode. Il s'appuiera sur les données de jetting (débit, pression, position de la buse, vitesse de rotation) et sera comparé à des images (sonar) de la cavité et son évolution. Une fois le modèle calibré, il sera appliqué de manière prédictive à d'autres cavités.

Fin de la première semaine : présentation des résultats à Orano.

MP4 – Comparaison des impacts environnementaux (6 étudiants)

Sur base des simulations BHM et ISR sur le gisement, ce mini-projet a pour but d'évaluer les impacts environnementaux (qualité des eaux, stabilité) associés aux deux techniques. La planification de la remédiation du site devra être prise en compte (monitoring qualité des eaux – remblais – résidus miniers).

MP5 – Comparaison des impacts CO_2 (5 étudiants)
Sur base des simulations réalisées au préalable, comparer d'un point de vue énergétique les deux procédés afin de déterminer leur empreinte climatique.

MP6 – Synthèse globale technico-économique-environnementale des deux techniques (5 étudiants)
Sur base des simulations réalisées au préalable, déterminer les espérances de gain économiques des deux techniques en les comparant à des techniques minières plus traditionnelles. Egalement, via l'interaction avec les MP4 & 5, tenter de déterminer un rendement financier global en prenant en compte la post-exploitation. Pour ouvrir à d'autres projets, les conditions géologiques du gisement (profondeur, hydrogéologie, teneur, minéralogie, …) pourront être utilisées pour une étude de sensibilité.

LES VISITES

Durant la première semaine, 3 visites sont prévues. Une visite d'une mine de gypse à ciel ouvert et souterraine. Ensuite, une visite de traitement de sol par *jet-grouting* sera réalisée sur les chantiers du Grand Paris comme analogue de la technique *Bore Hole Mining*.

PROGRAMME PREVISIONNEL

Semaine 1 : Lundi : conférences introductives à Orano. Mardi-Jeudi : visites. Vendredi : cours à Fontainebleau
Semaine 2 : MP1-2-3 + présentation des résultats
Semaine 3 : MP4-5-6 et rédaction du rapport

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Contact : Nicolas Seigneur : nicolas.seigneur@mines-paristech.fr

ELABORATION D'UN VERRE POUR LE FLACONNAGE DE LUXE

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateurs :** Franck Pigeonneau (CEMEF) & Patricia Hee (CERFAV)
- **Encadrants :** Lucile Cornu, Théo Desfontaines, Ambre Camus, Mohamed Zahaf (CERFAV)
- **Centre de recherche concerné** : CEMEF
- **Lieux :** Paris & CERFAV (Vannes-le-Châtel, Meurthe-et-Moselle)

RESUME

A l'occasion de ce MIG le métier d'ingénieur R&D en fabrication du verre sera entrevu. Au cours de la première semaine, les bases sur la nature particulière de l'état vitreux, les principes de l'élaboration et de sa production à l'échelle industrielle seront présentés. Des industriels producteurs et utilisateurs de verre présenteront les enjeux techniques et économiques de la filière verre en France. Deux visites permettront de voir plus concrètement ce qu'est une usine de verre. Les deux autres semaines de la période bloquée seront consacrées aux mini-projets réalisés au sein du Centre Européen de Recherches et de Formation aux Arts Verriers (CERFAV) mettant à disposition des fours de fusion et des moyens d'analyse. La chaine complète allant de la recherche d'une nouvelle composition, de sa fusion à sa production à l'échelle industrielle sera abordée en utilisant une base de données et un logiciel permettant de dimensionner un four qui auront été présentés au cours de la première semaine. Le coût de la fabrication du verre sera également évalué.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Il est devenu inutile de lister les produits de notre vie courante réalisés à base de verre. Transparent par nature, le verre est le matériau idéal pour laisser passer le lumière voire transporter de l'information. Il est egalement utilisé de façon plus discrète dans les matériaux d'isolation thermique ou phonique des maisons. Un domaine où le verre s'impose est bien-sûr les emballages (bouteilles, pots, flacons). C'est un secteur sur lequel le verre peut être en concurrence avec le plastique. Afin d'avoir des produits à la fois éco-responsables et ayant un haut niveau de désirabilité, on souhaite pouvoir avoir des emballages en verre pour remplacer ceux en plastique. La Figure 1 illustre l'objectif : **existe-t-il un verre qui puisse résister aux chocs de façon équivalente au plastique mais de poids équivalent ?**

Figure 1 – Illustration de l'objectif visant à réduire la matière d'un pot ou d'un flacon à résistance équivalente.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

L'objectif du MIG est de définir la composition d'un ou plusieurs verres en termes d'oxydes et d'additifs à base silico-sodo-calcique ayant les caractéristiques cibles définies par un cahier des charges. Après une initiation à la science du verre, des outils tels qu'une base de données matériaux, logiciels de dimensionnement de fours, modules python pour coupler à des outils d'Intelligence Artificielle (IA) seront mis en œuvre. De façon à vérifier les outils de prédictions, des verres seront élaborés en cherchant les moyens de les fondre dans des fours industriels. Les échantillons produits pourront être caractérisés par analyse de composition, mesure de température de transition vitreuse, analyse de casse.

La période bloquée de ce MIG sera décomposée en deux parties : la première semaine sera basée à l'école des Mines à Paris et les deux autres au sein du CERFAV. Ce dernier est un lieu unique où la recherche et l'apprentissage sont menés de pair. La **Figure 2-(a)** illustre le travail d'un apprenti verrier réalisant un gobelet par une technique artisanale de soufflage. La **Figure 2-(b)** permet de voir où le CERFAV est implanté. Il est situé dans un village historique de l'artisanat verrier à Vannes-le-Châtel, situé au sud-ouest de Nancy.

(a) **(b)**

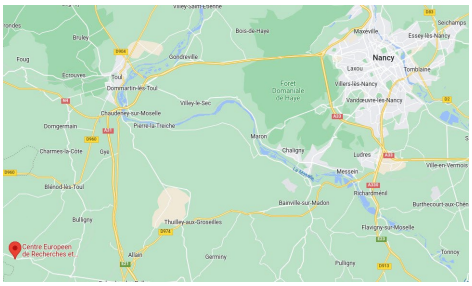

Figure 2 – **(a)** Verrier réalisant un gobelet au CERFAV par soufflage, **(b)** localisation du CERFAV.

Dans un premier temps, une initiation à la science du verre et à sa production industrielle sera faite. Les bases fondamentales de l'élaboration des verres ainsi que des outils permettant de prédire la demande en énergie et la pollution seront présentés. Deux visites sont au programme, l'une dans un centre de recherche et l'autre dans une usine de production. Les deux semaines suivantes permettront de travailler sur des points spécifiques par l'intermédiaire de mini-projets. Quatre mini-projets seront proposés calqués sur les missions d'un centre de R&D en élaboration des verres : formuler, fondre, analyser et produire.

Le rapport qui devra être fourni à l'issue de la période bloquée (23 décembre) sera à rédiger dès le début de la période bloquée. Pour le bon fonctionnement du MIG, un responsable du groupe sera nommé au lancement du MIG.

PROGRAMME PREVISIONNEL

Au cours de la première semaine, des cours introductifs sur la nature particulière du verre, de son élaboration et des procédés associés seront dispensés. Les outils numériques (logiciels, base de données) seront présentés. Des séminaires donnés par des ingénieurs de l'industrie verrière agrémenteront cette première semaine. Xavier Capilla de l'Institut du Verre, responsable environnement pour l'industrie du Verre, présentera les enjeux environnementaux de la filière verre en France. Jean-Marc Flesselles, directeur scientifique à Saint-Gobain Isover, fera un exposé sur les problèmes scientifiques et techniques liés à la production de matériaux isolants. Corinne Payen, directrice R&D de Verallia, parlera de la fabrication des bouteilles. En lien avec le projet de ce MIG, Oli- vier de Lataulade de L'Oréal

et en tant que responsable scientifique du packaging viendra exposer la démarche eco-responsable de L'Oréal donnant une grande part au verre. Les deux visites au programme sont détaillées plus bas. Les deux dernières semaines de la période bloquée se dérouleront au CERFAV après un voyage en train *via* Nancy. L'emploi du temps de la première semaine est détaillé ci-dessous.

Lundi 14 novembre 2022

Horaire	*Intitulé*	*Intervenant*
9h00–10h00	Présentation & organisation du MIG	Franck Pigeonneau
10h00–12h00	Introduction sur les verres d'oxydes	
13h30–15h00	L'industrie verrière face aux enjeux environnementaux	Xavier Capilla (Institut du verre)
15h30–17h00	Principe de l'élaboration des verres I	Franck Pigeonneau

Mardi 15 novembre 2022

Horaire	*Intitulé*	*Intervenant*
8h30–10h30	Principe de l'élaboration des verres II	Franck Pigeonneau
11h00–12h00	Les problèmes scientifiques de la production de la laine de verre	Jean-Marc Flesselles (Saint-Gobain, Isover)
13h30–15h00	Procédés de fusion	Franck Pigeonneau
15h30–17h00	Base de données Interglad V8	

Mercredi 16 novembre 2022

Horaire	*Intitulé*	*Intervenant*
09h00–10h30	Initiation aux techniques d'IA	Jonathan Viquerat
11h00–12h30	Travaux dirigés sur Interglad V8	Franck Pigeonneau
13h30–15h00	Oxydo-réduction et affinage des verres	Franck Pigeonneau
15h30–17h00	Les emballages en verre	Corinne Payen (Verallia)

Jeudi 17 novembre 2022

Horaire	*Intitulé*	*Intervenant*
9h00–10h30	Formation sur le logiciel Energy Balance Model (EBM)	Franck Pigeonneau
11h00–12h30	Le packaging en verre chez L'Oréal	Olivier de Lataulade (L'Oréal)
13h30–18h00	Visite de l'usine de SGD Pharma, 4 rte de Bonneuil, Sucy-en-Brie	

Vendredi 18 novembre 2022

Horaire	*Intitulé*	*Intervenant*
8h30–10h00	Formation documentaire	Sylvain Metafiot
10h30–12h00	Description des mini-projets et constitution des groupes	
13h30–18h00	Visite du centre de recherche de Corning, 7 bis avenue de Valvins, Avon	

LES VISITES

Deux visites sont au programme de ce MIG qui auront lieu au cours de la première semaine. Il est nécessaire d'avoir une **pièce d'identité (CNI ou passeport)** lors de ces visites sous peine de devoir rentrer à la maison ! Il est également nécessaire d'indiquer la monture pour pourvoir prendre des équipements de sécurité. Des comptes-rendus de visite seront à réaliser et à mettre dans le rapport final du MIG.

SGD Pharma, Sucy-en-Brie

La société SGD Pharma produit des emballages destinés au marché pharmaceutique. Il s'agit principalement de petits contenants comme représentés sur la Figure 3. SGD Pharma dispose de trois sites industriels en France. Pour cette visite, nous irons sur celui localisé dans le Val de Marne à Sucy-en-Brie. Il a l'avantage d'être simplement accessible en RER.

Figure 3 – Emballages produits par SGD Pharma destinés au marché pharmaceutique.

L'adresse de SGD Pharma est **4 route de Bonneuil, 94370 Sucy-en-Brie**. En prenant comme point de départ, l'école des Mines, le trajet en transport en commun est le suivant :

1. RER B en direction du nord depuis le Luxembourg jusqu'à Châtelet-Les Halles ;
2. RER A, direction Boissy-Saint-Léger, de Châtelet-Les Halles à Sucy-Bonneuil ;
3. Le reste se fait à pied (450 m).

Nous sommes attendus à 13h30. Notre contact à l'usine sera Anne Corsini.

Corning, Avon

La société multinationale Corning dispose en France du Centre Européen de Technologie de Corning (CETC). Corning est une société qui produit et commercialise des verres de spécialités utilisés en téléphonie, pour les écrans, en télécommunication par fibres optiques, en sciences de la vie, en technologie pharmaceutique, entre autres.

Le CETC est localisé sur la commune d'Avon, se trouvant à proximité de Fontainebleau. Les détails pour se rendre sur le site dont l'adresse exacte est **7bis avenue de Valvins, 77210 Avon** sont donnés ci-dessous en prenant comme point de départ l'école des Mines de Paris :

Figure 4 – CETC de Corning situé 7bis avenue de Valvins, 77210 Avon.

1. RER B en direction du nord depuis le Luxembourg jusqu'à Châtelet-Les Halles ;
2. RER A de Châtelet-Les Halles à Gare de Lyon ;
3. Ligne R en direction de Montargis avec arrêt à Fontainebleau-Avon ;
4. Bus 9 en direction de ZA Bernache, arrêt Corning ou marche à pied (1 km).

Le temps de trajet est de l'ordre d'une heure. Le rendez-vous est fixé à 13h30 au CETC. Nous serons accueillis par Peggy Georges.

MINI-PROJETS (MP)

L'objectif global du MIG est de pouvoir définir la composition d'un ou de plusieurs verres ayant des propriétés cibles. Comme montrer sur la Figure 5, les quatre fonctions que l'on retrouve dans les centres de R&D seront déclinées sous forme de mini-projets. Après avoir

défini les propriétés du verre, il faut arriver à le fondre sans impuretés et être capable de le synthétiser à l'échelle industrielle à moindre coût.

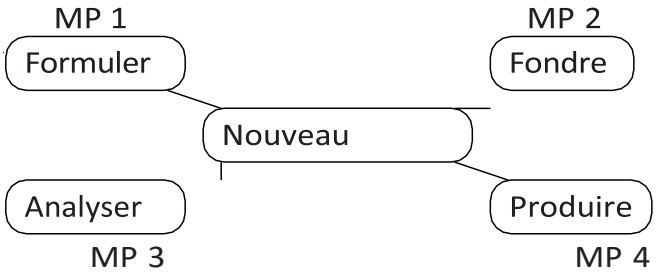

Figure 5 – Objectif du MIG décliné sous forme de quatre grandes activités de R&D.

MP 1 : Formulation de compositions verrières

Après discussion avec notre ≺ client ≻, un cahier des charges est défini portant sur les propriétés cibles telles que la masse volumique, la température de transition vitreuse, la température du liquidus, la ténacité. Avoir un masse volumique assez basse présente de l'intérêt pour réduire le poids des articles à produire. Les températures de transition vitreuse et du liquidus ont une importance pour faciliter la fusion. Finalement, la ténacité qui caractérise la fragilité du verre devra être choisie la plus élevée possible.
Pour chercher des gammes de compositions de verre répondant à nos préconisations, la base de données Interglad V8 sera utilisée. Cette dernière permet de faire une recherche simple de diverses propriétés pour une très large gamme de compositions. Elle est riche de plus de 380000 verres dont les données sont collectées suite a des publications d'articles ou de brevets. La base dispose d'une fonctionnalité de recherche de compositions en fonction de propriétés cibles. En fonction de l'avancée des travaux, l'intégration d'outils basés sur l'IA sera envisageable. Ce groupe aura donc pour missions :

1. Définition du cahier des charges ;
2. Recherche des compositions de verre à l'aide d'Interglad V8 ;
3. Utilisation d'outils d'IA pour affiner les compositions ;
4. Détermination des matières premières et du coût.

MP 2 : Fusion et qualité des verres

Lorsqu'une composition de verre a été choisie, il est nécessaire de vérifier si le verre est capable d'être synthétisé. La mission de ce mini-projet est de faire des fusions à l'échelle du laboratoire dans des fours de petites capacités (1 à 2 kg). A partir de la connaissance des températures de liquidus du verre, la température de fusion peut-être estimée. Il est néanmoins crucial de définir également les affinants qui permettent une élimination des impuretés (bulles et infondus) le plus rapide. Pour y arriver, on utilisera des outils numériques développés sous Python pour tester la fusion. Ces outils seront introduits lors de la première semaine. Les objectifs de ce mini-projet seront alors :

1. Détermination des feuilles de composition ;
2. Utilisation de modèle de redox/affinage ;
3. Réalisation de fusion à différentes températures et différentes concentrations d'affinants ;
4. Évaluation de la qualité des verres synthétisés.

MP 3 : Analyses chimiques, mécaniques et thermodynamique

Il est important de vérifier que les verres synthétisés sont bien conformes au cahier des charges. Pour cela, les propriétés doivent être vérifiées. Ce troisième mini-projet sera constitué d'une équipe dont la mission sera de mettre en place des moyens d'analyse permettant de mesurer les propriétés des verres synthétisés dans des petits fours. Les

données récoltées lors des analyses pourront même être mises à disposition de la communauté scientifique pour enrichir les bases de données. Les missions de ce mini-projet seront :

1. Synthèse des verres en petites quantités ;
2. Dilatométrie (coefficient de dilatation volumique) ;
3. Analyse de composition par MEB-EDS ;
4. Analyse DSC pour déterminer T_g, C_p ;
5. Analyse de casse.

MP 4 : Dimensionnement procédés
Lorsque le verre est connu et que sa manière de l'affiner l'est aussi, la question du procédé le mieux adapté à la production de masse se pose. Il devient alors important de connaître la demande énergétique pour le produire à l'échelle industrielle. Sans avoir recours à des simulations numériques détaillées du procédé, des outils basés sur des bilans globaux d'un four sont à utiliser. A cet effet, le logiciel Energy Balance Model (EBM) de Celsian sera utilisé. L'équipe de ce mini-projet aura alors à

1. déterminer l'enthalpie de réaction de la matière première et des propriétés thermodynamiques (ρ, C_p) ;
2. déterminer la puissance à fournir pour fondre le verre jusqu'à une température de sortie qui sera à fixer en fonction de la viscosité du verre ;
3. prévoir le mode de chauffe : énergies fossile, électrique voire les deux ;
4. calculer le coût de production du verre par unité de masse.

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

La première semaine aura lieu à l'école. Les salles seront communiquées dès qu'elles auront été attribuées. Pendant les deux semaines qui auront lieu au CERFAV, nous séjournerons dans l'hôtel de la Haie des Vignes situé sur la commune d'Allain, en demi-pension (petit-déjeuner et dîner). Pour s'y rendre, nous partirons de Paris (gare de l'est) pour aller à Nancy. De là, nous pourrons utiliser les transports en commun (train et autocar) pour aller à Colombey-les-belles. Les détails des voyages sont les suivants :

- **Voyage aller le dimanche 20 novembre :**
  - Paris (gare de l'est)/Nancy par TGV INOUI 2587, départ 9h10, arrivée 10h48 ;
  - Nancy/Neufchateau, départ 16h35 par TER 836374, arrivée à 17h25 ;
  - Neufchateau/Colombey-les-Belles, départ 17h33 par autocar 35247, arrivée à 17h59.
- **Voyage retour le vendredi 2 décembre :**
  - Colombey-les-Belles/Neufchateau, départ 11h20 par autocar 35242, arrivée à 11h48 ;
  - Neufchateau/Nancy, départ 12h42 par TER 836385, arrivée à 13h29 ;
  - Nancy/Paris (gare de l'est) par TGV INOUI 2544, départ 16h11, arrivée 17h50.

Un billet de groupe sera utilisé pour ces deux voyages. L'hôtel est situé à 2 km de l'arrêt de bus Colombey- les-belles Mairie au lieu-dit ≺ la haie des vignes ≻, 54170 Allain.

Pendant la semaine, une navette sera mise en place pour aller au CERFAV. Au cours de la période bloquée, votre contact sera

Contact : Franck Pigeonneau : franck.pigeonneau@minesparis.psl.eu, Tél. 06 31 26 04 72.

LA RESSOURCE SOLAIRE DANS LA TRANSITION DE LA VILLE DE MARSEILLE VERS SON OBJECTIF DE VILLE NEUTRE EN CARBONE D'ICI 2030

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateurs :** Philippe Blanc, Joris Masafont
- **Encadrants :** Romain Besseau (JRC), Nathan Bertho (MINES)
- **Centre de recherche concerné :** Centre Observation, Impacts, Energie (OIE)
- **Lieux :** Marseille, 13 (semaine 1) puis Sophia Antipolis, 06 (semaines 2 et 3)

RESUME

La ville de Marseille a récemment affirmé sa volonté d'être parmi les 100 villes européenne à atteindre la neutralité carbone d'ici 2030, avec sa labélisation par la « EU Mission: Climate-Neutral and Smart Cities », en avril 2022. Le projet du MIG SOLAIRE consiste à contribuer aux réflexions sur le chemin vers la neutralité carbone, suivant la très riche perspective énergie – eau – alimentation, par le double prisme de la ressource solaire et de la renaturation urbaine.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

La ville Marseille s'engage à atteindre non seulement la neutralité carbone d'ici 2030 mais aussi d'être une ville d'expérimentations et d'innovation pour ouvrir la voie et paver le chemin pour les autres villes européennes à l'horizon 2050. La question du chemin vers la neutralité carbone d'une ville comme celle de Marseille est formidablement complexe et passionnante. La question du chemin vers la neutralité carbone d'une ville comme celle de Marseille est formidablement complexe et passionnante sur l'on considère l'intrication profonde entre les systèmes de bâtiments, d'industries, de réseaux de transport, d'énergie, d'eau, de déchets, d'alimentation, d'information et de biens et services. Compte tenu du climat méditerranéen de la ville de Marseille, le MIG SOLAIRE propose d'aborder cette question suivant la très riche perspective énergie – eau – alimentation, par le double prisme de la ressource solaire et de la renaturation urbaine. Le MIG SOLAIRE travaillera notamment en partenariat avec le département Parcs et Jardins de la ville de Marseille qui gère son patrimoine des espaces verts de 700 ha, correspondant à presque 3 % de la superficie de la commune. Le point de contact de ce partenariat est M. Brice DACHEUX AUZIERE. D'autres parties prenantes de la ville de Marseille seront bien entendues considérées comme les départements en charge de l'énergie ou encore, l'équipe en charge du projet « *EU Mission: Climate-Neutral and Smart Cities* ».

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

Le MIG SOLAIRE n'est pas organisé en mini-projets : aidés par une introduction à la méthodologie LEAN, les élèves trouveront par eux-mêmes une organisation dynamique et efficace du travail en ateliers pour mener à bien ce projet, avec le support et l'expertise d'encadrants en ingénierie, en urbanisme et en paysagisme.

LES VISITES ET DEROULEMENT

- **J0, J1-2** : descente dans le Sud avec visites liées à des infrastructures énergétiques solaires, hydro et nucléaire (si possible) (départ le dimanche 13 novembre en fin d'après-midi)
- **J3** : conférences introductives avec les parties prenantes, visites (Marseille)
- **J4-5** : formation au LEAN, série de conférences (ressources solaires, paysage, urbanisme,), ateliers (Marseille, fin de journée sur Sophia)
- **J10-12** : continuation des ateliers sur Sophia
- **J15-18** : finalisation des ateliers, synthèse, rédaction
- **J19** : restitution orale aux parties de prenantes

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Philippe Blanc, tél. : 06 60 65 01 50, philippe.blanc@minesparis.psl.eu
(Utilisation de WhatsApp : création d'un groupe élèves/encadrants pour organisation du MIG).