

## Analyse Structurelle et Aérodynamique couplée pour l'optimisation du rendement et de la durée de vie d'une centrale solaire photovoltaïque

**Coordinateurs :** Pierre-Olivier Bouchard, Elie Hachem

**Encadrants :** Jean-Luc Bouvard, Daniel Pino Munoz, Thibaut Barbier, Philippe Blanc

**Centres de recherche concernés :** CEMEF

**Lieux :** Sophia Antipolis

### RESUME :

L'énergie solaire photovoltaïque (EPV) est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus fiables tout en offrant l'avantage d'être complètement silencieuse. Une fois installés, les panneaux nécessitent peu d'entretien et sont donc associés à un coût de fonctionnement particulièrement bas. Récemment, des structures permettant aux panneaux de suivre la course du soleil ont été développées de manière à améliorer le rendement de ces centrales solaires. Ces structures, appelées tracker en anglais ou héliotrope en français, permettent une augmentation de 15-25% de production par rapport à des structures fixes. Ces structures, particulièrement imposantes (pouvant faire jusqu'à cinquante mètres de long par 4.5m de large pour le tracker sur 1 axe) et soumises à des vents importants, présentent cependant des défis de dimensionnement aérodynamique et de structure majeurs, défis que nous étudierons dans le cadre de ce MIG 2020.

### CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

Ce MIG s'inscrit dans le contexte du développement et de l'amélioration du rendement des sources d'énergie renouvelables. Pour pouvoir remplacer à terme les énergies fossiles il est en effet impératif de démontrer les performances, la viabilité et la fiabilité de telles solutions eco-responsables. Nous aborderons cette problématique au travers de la conception d'une centrale solaire photovoltaïque avec pour objectif d'utiliser des outils de modélisation numérique innovants et performants. Nous montrerons l'utilité de mettre en place une approche d'ingénierie multidisciplinaire (aérodynamique, calcul de structure, matériaux, performances énergétiques), approche utilisée pour la conception d'autres structures telles que éoliennes, structures marines houlomotrices, etc ...

### OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

Au travers du thème « Energie renouvelable », le MIG AERO a pour but de vous placer dans la peau d'ingénieurs participant au développement de technologies innovantes dans le domaine des centrales solaires. Pour y arriver, il vous sera nécessaire, dans un premier temps, d'évaluer les centrales solaires actuelles et leurs limitations. Vous serez ensuite amenés à étudier plus en détail les nouveaux

systèmes d'amélioration de production d'énergie notamment la conception des suiveurs photovoltaïques. Y a-t-il un fonctionnement optimal pour ces nouveaux systèmes ? Les défis technologiques à relever sont-ils réalistes face à des phénomènes météorologiques extrêmes? Les coûts d'infrastructure rendent-ils ces projets économiquement compétitifs ?

L'énergie photovoltaïque connaît un essor considérable depuis 5 ans à l'échelle mondiale. L'Europe présente, pour sa part, un parc en exploitation de plus de 86,6 GWc. A l'horizon 2050, il est prévu une proportion de 16% de l'énergie électrique mondiale fournie par l'énergie photovoltaïque.

Fin 2015, le plus grand parc photovoltaïque d'Europe a été inauguré en Gironde. Il se distingue par une structure moins coûteuse, facile à mettre en place et surtout très performante. Avec une puissance nominale de 300 MWc, elle peut produire jusqu'à 350 gigawatt heures (GWh) par an, soit l'équivalent de la consommation d'une ville moyenne.

Ce projet, extrêmement ambitieux, présente une solution innovante qui augmente considérablement le rendement d'une centrale et par conséquent la production d'électricité s'en voit optimisée.



*Centrale solaire équipée par Optimum Tracker*

Ce projet innovant est extrêmement prometteur. De nombreux défis techniques et technologiques restent à relever pour optimiser et généraliser l'utilisation des trackers dans toutes les centrales solaires. L'impact écologique et économique devient immédiat!

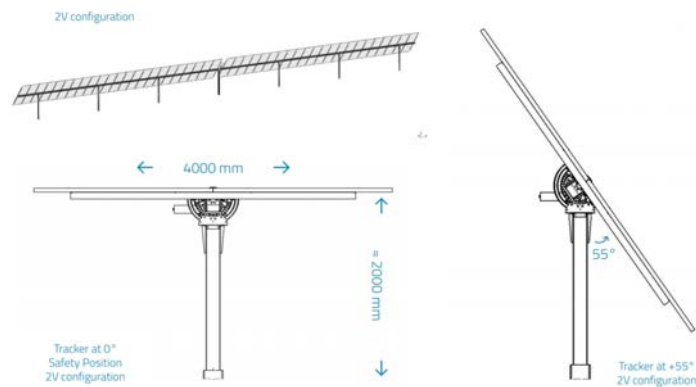
Au cours de ce MIG vous serez donc confrontés aux problématiques de conception rencontrées par les ingénieurs d'Optimum Tracker et vous serez formés à des outils de caractérisation et de modélisation performants et pluridisciplinaires de manière à répondre aux problématiques évoquées plus haut. Par ailleurs, les visites vous permettront de rencontrer des ingénieurs de grands groupes industriels ou de start-

ups, ce qui vous fera notamment découvrir la complémentarité des ingénieurs travaillant dans ces domaines.

### MINI-PROJETS

Dans le cadre du MIG AERO, nous nous intéresserons plus particulièrement à la conception et à l'analyse des structures du tracker en fonction des conditions d'utilisation et face à des phénomènes météorologiques extrêmes. Le choix des matériaux, la forme de la structure, l'aérodynamisme et les fluctuations des panneaux seront ainsi abordés. Nous descendrons par ailleurs à l'échelle inférieure d'un module PV pour comprendre sa structure multimatériaux et analyser ses modes de défaillance potentiels en fonction des conditions d'utilisation.

Il s'agira d'étudier plus en détails les défis scientifiques, les verrous technologiques, ainsi que les problématiques économiques et industrielles relatives à la conception et à la réalisation des centrales solaires équipées par des trackers. Nous nous intéresserons ainsi aux performances structurelles, l'impact de l'aérodynamisme et donc l'analyse vibratoire des panneaux photovoltaïques et leur structure et nous serons amenés à proposer des optimisations couplées entre forme structurelle, choix de matériaux, positionnement et angle des structures, comme le montre la figure suivante.

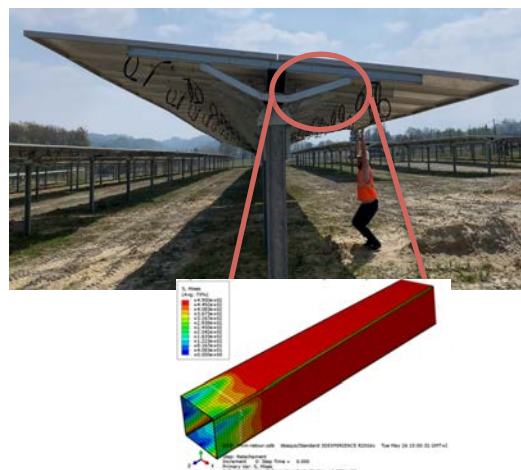


Prises de vue du système tracker '2V' actuel d'Optimum Tracker

Ces études seront réalisées au travers de mini projets variés et complémentaires :

- **Mig AERO 1 : Structure et Matériaux**

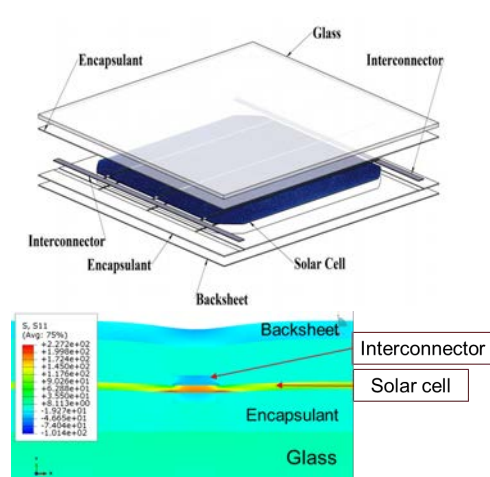
Sur la base des champs de pression issus de l'analyse aérodynamique, nous étudierons la résistance des longerons de maintien et de guidage des panneaux solaires. Les calculs, réalisés à l'aide du logiciel éléments finis Abaqus, largement utilisé dans l'industrie, permettra de proposer une conception robuste pour faire face à des conditions de vent extrême. La précision des calculs nécessitera de



caractériser correctement le comportement des matériaux.

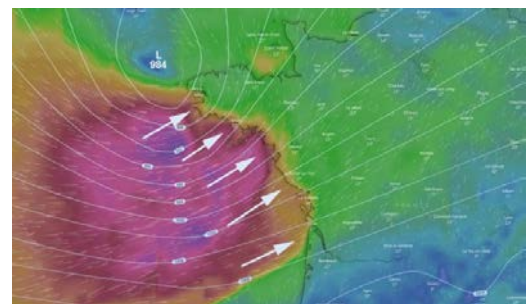
- **Mig AERO 2 : Analyse d'un module PV**

Ce miniprojet se place à l'échelle d'un module PV, structure multimatériaux composée d'une cellule solaire, d'encapsulants de protection ainsi que d'un backsheet d'un côté et d'une façade avant en verre. L'analyse de la mise en forme (lamination) de ce module et de son comportement sous l'action de conditions environnementales nous permettra d'analyser les zones de contraintes élevées et par conséquent de défaillance de ces modules.



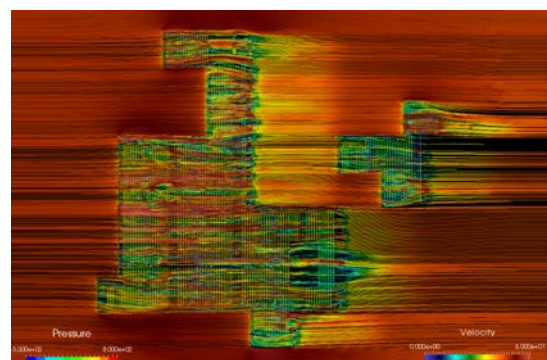
- **Mig AERO 3 : Prévion locale de rafales**

Dans ce mini-projet, l'objectif est de déterminer s'il est possible à partir de prévisions météorologiques de prévoir de manière fiable des vents importants localement sur une centrale. L'intérêt principal de cette prévision est de mieux anticiper la présence de vent dépassant les seuils de mise en sécurité des centrales pour créer des alertes au client si certains trackers nécessitent une maintenance. Pour ce travail, les étudiants utiliseront des mesures historiques d'anémomètre de différents sites ainsi qu'un historique de prévision météorologique pour évaluer la capacité d'étalonnage et d'estimation des incertitudes de cette dernière.



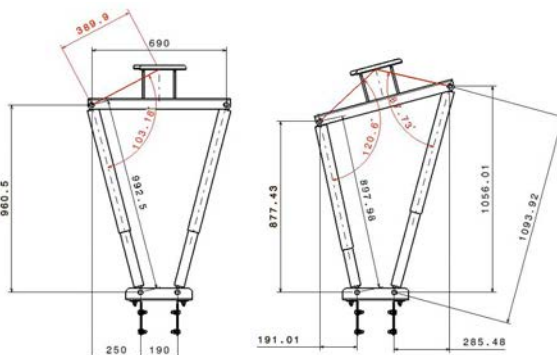
- **Mig AERO 4 : Aérodynamique**

Ce miniprojet vise à modéliser et à simuler les écoulements turbulents passant à travers les panneaux et leur structure dans une centrale photovoltaïque de très grande envergure. Comme le montre la figure (vue d'en haut), l'écoulement est complexe et donc la simulation numérique fournira des détails importants utiles pour mieux comprendre la distribution d'air et par conséquent pouvoir analyser les champs de pression exercés sur les panneaux. Nous élaborerons donc des recommandations vis-à-vis des questions d'optimisation des positions ainsi que des angles des panneaux.



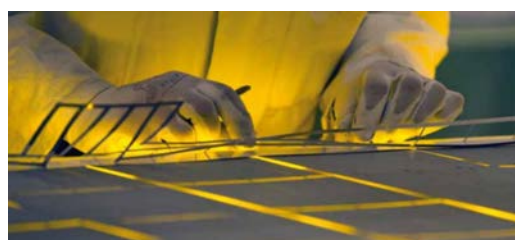
• **Mig AERO 5 : Aéroélasticité**

L'objectif de ce miniprojet est de rassembler les résultats précédents pour construire un modèle dynamique du tracker c'est-à-dire en considérant la réponse en torsion du longeron, l'inertie et les effets d'amortissement, pour vérifier la stabilité de la structure dans des conditions de vent fort. L'effet d'un changement brutal du vent, l'existence d'un mode oscillatoire des trackers ainsi que l'analyse des contraintes supplémentaires seront à évaluer.



• **Mig AERO 6 : Technique et économique**

L'investissement d'un projet photovoltaïque comprend une part de coûts incontournables que sont le matériel et son installation ainsi que les frais de raccordement au réseau. Des coûts additionnels peuvent venir grever le budget dans des proportions variables selon la typologie et la puissance de l'installation, le degré d'ingénierie nécessaire, etc. Ce miniprojet analysera les dernières solutions techniques ainsi que le modèle économique associé surtout pour des grandes centrales solaires.



**PROGRAMME PREVISIONNEL**

	Matin	Après midi
Lundi 16 & Mardi 17 Novembre	Introduction au MIG - Visites - Transfert vers Sophia-Antipolis	
Mercredi 18 Novembre	Visite Optimum Tracker	Visite centrale solaire
Jeudi 19 Novembre	Introduction à la mécanique des matériaux solides	Introduction à la mécanique des fluides
Vendredi 20 Novembre	Visite Thales Alenia Space	Demarrage des minis projets
Lundi 23 Novembre	Introduction simulation par éléments finis	Séminaire CEA LITEN
Mardi 24 Novembre	Mini projets	Mini projets
Mercredi 25 Novembre	Visite Entreprise PV Sophilopolitaine	Mini projets
Jeudi 26 Novembre	Mini projets	Mini projets
Vendredi 27 Novembre	Mini projets	Mini projets
Lundi 30 Novembre	Mini projets	Mini projets
Mardi 1 Decembre	Mini projets	Mini projets
Mercredi 2 Decembre	Mini projets	Mini projets
Jeudi 3 Decembre	Synthèse et rédaction	Synthèse et rédaction
Vendredi 4 Decembre	Synthèse et rédaction	Synthèse et rédaction + Départ

**Le programme est en cours de finalisation et sera adapté aux conditions sanitaires**

## DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Le MIG AERO s'effectuera sur le site de Sophia-Antipolis où les projets du MIG seront réalisés. Les voyages de Paris à Nice seront effectués par avion.

- **Coordinateurs :** Prof. Pierre-Olivier Bouchard [pierre-olivier.bouchard@mines-paristech.fr](mailto:pierre-olivier.bouchard@mines-paristech.fr)  
Prof. Elie Hachem [elie.hachem@mines-paristech.fr](mailto:elie.hachem@mines-paristech.fr)  
Tel<sub>1</sub> : 04 93 67 89 21  
Tel<sub>2</sub> : 04 93 95 74 58
- **Animateurs :** Thibaut Barbier [t.barbier@optimum-tracker.com](mailto:t.barbier@optimum-tracker.com)  
Jean-Luc Bouvard: [jean-luc.bouvard@mines-paristech.fr](mailto:jean-luc.bouvard@mines-paristech.fr)  
Daniel Pino Munoz: [Daniel.pino\\_munoz@mines-paristech.fr](mailto:Daniel.pino_munoz@mines-paristech.fr)  
Philippe Blanc: [philippe.blanc@mines-paristech.fr](mailto:philippe.blanc@mines-paristech.fr)
- **Voyages :** Sylvie Massol [sylvie.massol@mines-paristech.fr](mailto:sylvie.massol@mines-paristech.fr)  
Tel : 04 93 95 74 17  
Fax : 04 93 95 74 93

Dès la constitution du groupe, il faudra nous faire parvenir au plus vite une copie de votre carte d'identité (recto-verso) ou de votre passeport. Ces documents seront également indispensables pour les visites.

## MIG FORENSIC

**Coordinateurs :** Sébastien Travadel et Enrico Zio

**Encadrants :**

- Sébastien Travadel (CRC)
- Enrico Zio (CRC / Institut Polytechnique de Milan)
- Aldo Napoli (CRC)
- Eva Artusi (doctorante CRC / Naval Group), Luca Istrate, Tudor Cebere et Dan Matei (élèves en Master de *Computer Science* à Université Polytechnique de Bucarest, *visiting students* au CRC).

**Centres de recherche concerné :** centre de recherche sur les risques et les crises (CRC).

**Lieux :** Sophia Antipolis

### RESUME :

Le MIG Forensic propose d'initier les futurs ingénieurs à la science des données appliquée à la maîtrise des risques. Il s'agit de couvrir un large spectre des problématiques de l'analyse de données (pré-traitement, apprentissage statistique, évaluation et présentation des résultats) afin de développer une solution efficace de détection d'anomalies rares pour un industriel majeur.

### CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

Le « Forensic Engineering » - ou ingénierie « forensique » - étudie les dysfonctionnements des systèmes industriels, de la simple panne à la catastrophe, afin de toujours mieux maîtriser leur performance. Cette démarche, à la source du raisonnement de l'ingénieur et à l'origine de nombreuses méthodes en sciences des données, bénéficie désormais d'un formidable levier avec la transformation digitale des entreprises. L'industrie « 4.0 » s'accompagne en effet d'une collecte massive d'informations pour alimenter des outils d'aide à la décision à base d'Intelligence Artificielle.

L'étude de cas est proposée par un industriel majeur. Elle s'appuie sur des données réelles, enregistrées durant plusieurs années sur des machines à fort enjeu économique. Certains dysfonctionnements ont été détectés tardivement à l'aide de la solution logicielle actuellement utilisée, menaçant la continuité des opérations. Les élèves devront développer des méthodes d'analyse de signaux faibles afin de mieux anticiper ce type de défaillance.

## OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

Les élèves s'organiseront en mini-groupes pour réaliser les tâches suivantes :

- préparer les données brutes fournies par le partenaire industriel, correspondant à plusieurs années de mesures (températures, vibrations) sur des pièces critiques ;
- proposer une solution de détection d'anomalies rares, mettant en œuvre notamment des algorithmes d'apprentissage statistique (en Python) ;
- évaluer la performance de la solution en comparaison de celle mise en œuvre par l'industriel ;
- intégrer dans un *Jupyter Notebook* la description de la démarche d'ingénierie, les algorithmes utilisés ainsi que des interfaces de visualisation des résultats ;
- soumettre la solution aux experts / utilisateurs finaux.

### LES VISITES

- Site de surveillance des installations d'Air Liquide pour l'Europe (Lyon)
- Site R&D de Schneider Electric (Nice)
- Thalès Alenia Space (Cannes)

### PROGRAMME PREVISIONNEL

Date	Matin	Après-midi
Lundi 16	Introduction au « Forensic Engineering » (ENSMP)	Départ en train pour Lyon
Mardi 17	Visite du centre de contrôle digital d'Air Liquide. Départ en train pour Nice.	
Mercredi 18	Introduction aux méthodes d'analyse de données pour la détection d'anomalies	
Jeudi 19	Méthodes (suite) : <i>feature engineering</i> , apprentissage...	
Vendredi 20	Visite du site R&D de Schneider Electric	Prise en main de l'environnement informatique
Lundi 23	Introduction au « Lean Management »	Premier abord des données
Mardi 24	Projet (visualisation et prétraitement des données)	Méthodes bibliographiques
Mercredi 25	Projet (modélisation)	
Jeudi 26	Visite de Thalès Alenia Space	Projet (traitement des données)
Vendredi 27	Projet (traitement des données)	
Lundi 30	Projet (traitement des données)	
Mardi 1 <sup>er</sup>	Projet (traitement des données)	Projet (intégration / IHM)
Mercredi 2	Projet (synthèse)	Présentation auprès de l'industriel
Jeudi 3	Préparation du <i>Jupyter Notebook</i>	
Vendredi 4	Restitution devant les autres MIGs sophiapolitains	

### DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)



L'hébergement de l'ensemble des élèves des MIGs sphiapolitains se fera en résidence étudiante à proximité du site de l'Ecole.

Pour toute information complémentaire, contacter Sébastien Travadel :

Mail : [sebastien.travadel@mines-paristech.fr](mailto:sebastien.travadel@mines-paristech.fr)

Tél : 06 47 93 17 25

## LES GAZ RENOUVELABLES AU CŒUR DE LA TRANSITION ENERGETIQUE

**Coordinateurs :** Elise El Ahmar (CTP), Marco Campestrini (CTP)

**Encadrant industriel :** Frédéric Legrand (ENGIE Lab CRIGEN)

**Centre de recherche concernés :** Centre Thermodynamique des Procédés (CTP) et ENGIE Lab CRIGEN

**Lieux :** CTP, 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau et ENGIE Lab CRIGEN, 4 rue Joséphine Baker, 92 240 Stains

### RESUME :

Le biogaz, mélange composé principalement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), est produit grâce à un processus de dégradation de matières organiques en l'absence d'oxygène. Le biométhane résulte d'un processus d'épuration du biogaz lui permettant d'avoir les mêmes propriétés que le gaz naturel et est garanti d'origine 100 % renouvelable. Le biométhane représente une voie de production d'hydrogène renouvelable ou « vert ».

Les élèves seront amenés à découvrir le biogaz/biométhane et la molécule  $\text{H}_2$  de leurs productions jusqu'à leurs différentes applications ainsi que le captage et la valorisation du  $\text{CO}_2$ .

La consommation de gaz renouvelables permet de mieux valoriser les déchets des territoires et de lutter contre le changement climatique tout en dynamisant l'économie locale et l'activité des agriculteurs locaux.

La molécule  $\text{H}_2$ , quant à elle, constitue une vraie piste d'avenir pour la transition énergétique en permettant le développement des énergies renouvelables décentralisées et l'explosion de solutions de mobilité verte.

### CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

Un gaz renouvelable (dit aussi gaz vert) est un gaz utilisable par exemple pour la production d'électricité, de chaleur, ou encore il peut être utilisé comme carburant. Un gaz renouvelable n'est pas extrait ou produit en partant des réserves fossiles, comme le gaz naturel. Le biogaz est aujourd'hui le gaz renouvelable par excellence.



**Un gaz vert est un gaz garanti d'origine renouvelable**

## Biogaz/Biométhane

Le biogaz est un gaz combustible, un mélange en moyenne de méthane (CH<sub>4</sub>) à 65% et de CO<sub>2</sub> à 35%. C'est une ressource d'énergie renouvelable issue de la biomasse. Cependant le nom 'biogaz' regroupe une grande variété de gaz issus de procédés de traitement spécifiques, à partir des déchets organiques divers – industriels, d'origine animale, ménagère etc.

La composition (Tableau 1) et les propriétés du biogaz varient selon les intrants utilisés, les procédés de méthanisation, mais aussi la température, le temps de séjour hydraulique, etc. Les autres composants du biogaz sont le CO<sub>2</sub>, l'eau, l'azote, et des éléments indésirables en faible quantité comme l'H<sub>2</sub>S, les siloxanes, les composés organiques volatiles, les chlorés ou les fluorés.

Selon sa composition, le biogaz présente des caractéristiques qu'il est intéressant de comparer au gaz naturel et au propane. Le biogaz est un gaz sensiblement plus léger que l'air, il produit deux fois moins de calories par combustion à volume égal que le gaz naturel.

Composants	Ordures ménagères	Boues de STEP1	Déchets agricoles	Déchets de l'industrie agro-alimentaire
CH <sub>4</sub> % vol	50-60	60-75	60-75	68
CO <sub>2</sub> % vol	38-34	33-19	33-19	26
N <sub>2</sub> % vol	5-0	1-0	1-0	-
O <sub>2</sub> % vol	1-0	< 0,5	< 0,5	-
H <sub>2</sub> O % vol	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)
Total % vol	100	100	100	100
H <sub>2</sub> S mg/m <sup>3</sup>	100 – 900	1000 - 4000	3000 – 10 000	400
NH <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup>	-	-	50 - 100	-
Aromatiques mg/m <sup>3</sup>	0 – 200	-	-	-
Organochlorés ou organofluorés mg/m <sup>3</sup>	100-800	-	-	-

Tableau 1 : Composition du biogaz selon des sources différentes de production (biogaz énergie renouvelable, Naskeo environnement, 2008)

La valorisation énergétique des biogaz permet d'exploiter le potentiel énergétique de la matière organique contenue dans les déchets, tout en assurant, par la méthanisation, un traitement et le retour au sol de cette même matière organique. Le biogaz participe aux engagements de la France pour la production d'énergie renouvelable sous la forme d'électricité, de chaleur et de carburant. Sa valorisation permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, méthane et oxydes d'azotes notamment. L'énergie contenue dans un Nm<sup>3</sup> de biogaz contenant 60 % de méthane sera de 21,6 MJ ou 6 kWh, équivalant à environ 0,7 l d'essence ou 0,6 l de fuel.

Après épuration, le biogaz atteint le même niveau de qualité que le gaz naturel et peut donc être injecté dans les réseaux de distribution et de transport : on l'appelle alors biométhane. Au 30 septembre 2019, 105 sites injectent de biométhane en France. Environ 80% des producteurs de biométhane sont agriculteurs. La France pourrait produire 100 % de gaz renouvelable en 2050, selon une étude publiée par l'Ademe. Ce gaz participe à l'économie locale et favorise le développement d'une agriculture durable et pérenne économiquement :

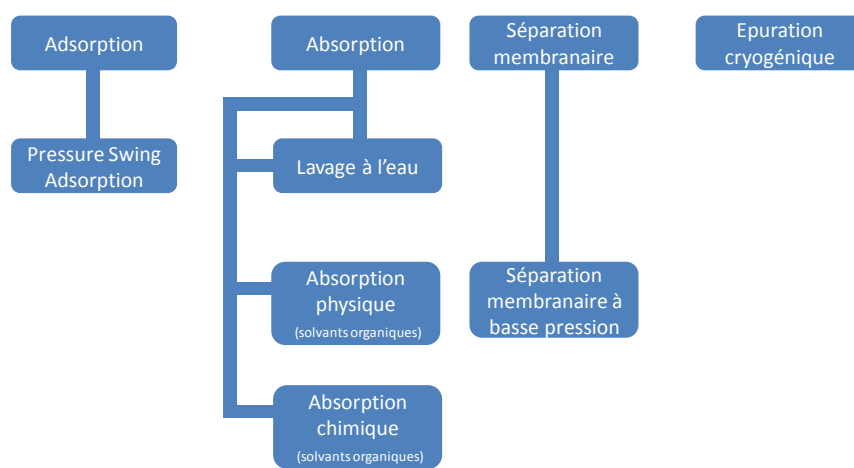
- Il transforme les déchets et effluents agricoles en énergie renouvelable
- Il est injecté localement dans le réseau et alimente les riverains
- Il représente un complément de revenus pour les agriculteurs

1 Boues de STEP : boues résiduaires issues de stations d'épuration traitant des eaux usées domestiques ou urbaines.

-Il génère un coproduit appelé digestat, engrais organique naturel qui se substitue aux engrais chimiques.

### Les procédés de purification du biogaz et de production de biométhane

Au méthane et au CO<sub>2</sub> que contient le gaz à la sortie du méthaniseur, s'ajoutent des traces (Tableau 1) de H<sub>2</sub>S, d'eau, d'azote, d'oxygène et des Composés Organiques Volatiles (COV), ce qui exige un prétraitement sur charbon actif (réputé pour sa porosité particulière) afin de retirer les COV et l'oxygène, conformément aux procédés d'adsorption bien connus. En fonction de l'utilisation du biogaz, il peut être nécessaire de le purifier et de séparer les différents gaz. Pour séparer le méthane des autres composants, il existe ensuite plusieurs procédés d'épuration possibles du biogaz (Figure 1) : l'adsorption, l'absorption physique ou chimique, la séparation membranaire ou la cryogénie. Tous se déroulent en trois étapes afin d'éliminer successivement le CO<sub>2</sub> (décarbonation), H<sub>2</sub>S (désulfuration), et l'eau (déshydratation).



Différents procédés d'épuration du biogaz (source Biogasmax, 2010).

### Production de l'hydrogène à partir de biométhane

Le biométhane ainsi obtenu peut-être utilisé pour la production de bio-hydrogène. Ce procédé contient normalement les opérations suivantes :

- Reformage du méthane à la vapeur d'eau (Steam Methane Reforming) : conversion de CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>O en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>

- Epuration pour l'élimination du CH<sub>4</sub> résiduel, et pour le captage de CO, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O pour atteindre une certaine pureté de l'hydrogène (par exemple, une pureté de 99,99% est nécessaire aux piles à combustible).

### Le marché de l'hydrogène

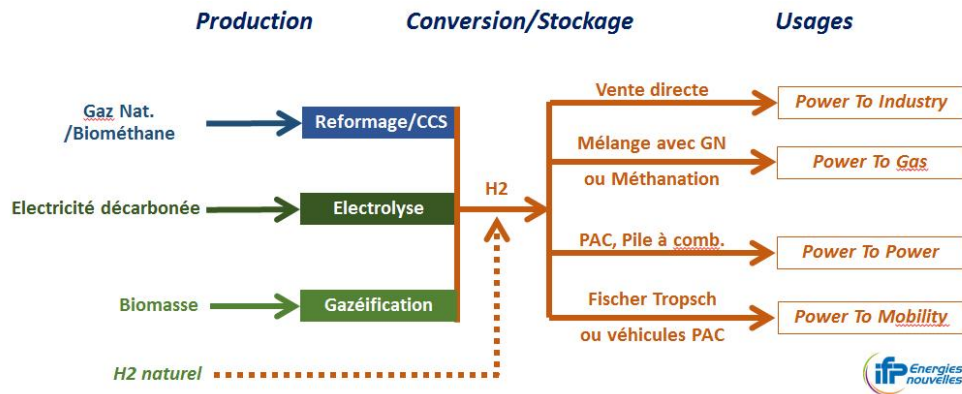
Aujourd'hui, les trois marchés les plus importants de l'hydrogène sont la désulfuration de carburants pétroliers (60%), la synthèse de l'ammoniac, principalement pour les engrais (25%), et la chimie (dont la production de méthanol) (10%). L'hydrogène peut également être utilisé, toutefois, pour produire de l'énergie thermique ou de l'électricité (à l'aide d'une pile à combustible), ou il peut être mélangé à une infrastructure de gaz naturel existante. Hydrogène peut en outre être couplé avec des piles à combustible pour générer de l'électricité. Une application émergente pour l'hydrogène et les piles à combustible aujourd'hui est dans les transports.

Le marché mondial de l'hydrogène industriel est estimé aujourd'hui à 60 Mt et le marché français est lui estimé à près de 1 Mt. L'hydrogène est produit à **94%** à partir d'**énergies fossiles** en France (gaz, charbon, hydrocarbures) et sa production industriel représente plus de 900 kt par an<sup>2</sup>.

2 Plan Hulot pour le déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique (2018).

## La chaîne hydrogène simplifiée

Une fois produit, cet hydrogène peut être stocké physiquement en attendant son utilisation sous forme de gaz ou de liquide. L'hydrogène peut être stocké à la surface des solides (par adsorption) ou dans les solides (par absorption).



### La chaîne hydrogène simplifiée : de la production aux usages.

#### OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

Le MIG sera piloté conjointement par le Centre Thermodynamique des Procédés de Mines Paris Tech et ENGIE (l'un des premiers producteurs d'énergies renouvelables en France). Le tableau ci-après présente le programme provisoire des trois semaines bloquées. Les élèves sont encouragés à poser leurs questions aux conférenciers, qui pourront les aider à acquérir les bases scientifiques, techniques, économiques, etc. Lors des synthèses de fin de semaine, chaque groupe devra présenter aux autres groupes l'avancée de ses travaux. 4 à 5 transparents seront demandés.

#### MINI-PROJETS

Les élèves devront se répartir en 3 groupes afin de travailler sur différents aspects concernant le biogaz et l'hydrogène en répondant à différentes questions.

Groupe 1 : Le marché du biogaz/bio-hydrogène : aspects économiques et environnementaux (Quelles ressources pour la production de biogaz ? Comment choisir le lieu d'implantation ? Acceptabilité et aspects territoriaux concernant l'usage de l'hydrogène dans la ville/sur le territoire, etc....).

Groupe 2 : Méthodes de production de l'hydrogène : Comment l'hydrogène est-il produit et quels sont ses effets sur le climat ? Comment produire un hydrogène compétitif, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre ? L'hydrogène renouvelable est-il compétitif sur le plan des coûts ?

Groupe 3 : Captage, purification et valorisation du CO<sub>2</sub> : Quelles sont les verrous technico-économiques des techniques de captage ? Quelles pourraient être les nouvelles applications afin d'augmenter la part de CO<sub>2</sub> actuellement valorisé comme matière première

**NB :** Un 4<sup>ème</sup> mini-projet (pour tous les élèves) sera proposé au cas où les visites ne pourront pas avoir lieu dû à la covid-19. Il s'agit de la simulation numérique d'une cuve de stockage d'hydrogène liquide (évaluer la variation de la température à travers les parois de la cuve, optimiser le taux d'évaporation de l'hydrogène liquide, ainsi que la variation de la hauteur de l'hydrogène liquide).

#### LES VISITES

- Visite des installations d'essais du centre de recherche, (ENGIE Lab CRIGEN, Stains).
- Visite de Cryopur (Epuración cryogénique du biogaz ; Massy).
- Visite centrale biométhane (ENGIE Lyon) (à confirmer).

**PROGRAMME PREVISIONNEL**

Jours	Semaine 1 (du 16/11 au 20/11)	Semaine 2 (du 23/11 au 27/11)	Semaine 3 (du 30/11 au 04/12)
<b>Lundi</b>	9h30-17h30 / Mines Paris M : Présentation du projet et Conférence introduction d'ENGIE AM : Place des <b>gaz verts</b> dans la transition énergétique, enjeux et usages des gaz verts (F. Legrand)	9h30-17h00 / Mines Paris (F. Legrand) -Déroulement d'un programme de recherche : du brevet à la mise en place de la technologie dans un projet industriel -Déroulement d'un projet industriel : du devis au démarrage de l'installation	9h30-17h00 / Lyon Visite centrale biométhane (à confirmer)
<b>Mardi</b>	09h00-17h00 / CTP M : <b>Recherche de documentaire</b> AM : Présentation et discussion autour du <b>développement durable</b> (C. Descamps-Large)	9h30-17h00 / Mines Paris <b>Captage et valorisation du CO<sub>2</sub></b> (F. Legrand) Enjeux du captage et applications Méthodologie et technologies de captages du CO <sub>2</sub> Les voies de valorisation du CO <sub>2</sub>	9h00-18h00 / CTP M : Visite du CTP AM : Travail de groupe
<b>Mercredi</b>	9h30-17h00 / Mines Paris <b>Biogaz</b> (F. Legrand) Production industrielle, purification et traitement de biogaz Marché actuel Projection du marché et des usages	9h00-17h00 M : Travail de groupe (Mines Paris) AM : Visite des installations d'essais du centre de recherche (ENGIE)	9h00-18h00 / CTP Travail de groupe
<b>Jeudi</b>	9h30-17h00 / Mines Paris <b>Hydrogène</b> (F. Legrand) Modes de production, Marché actuel Projection du marché et des usages	9h00-17h00 M : Travail de groupe (Mines Paris) AM : Visite Cryopur et présentation de la technologie (Massy)	9h00-18h00 / CTP Travail de groupe
<b>Vendredi</b>	9h00-17h00 / CTP M : <b>Généralités sur l'hydrogène</b> (E. El Ahmar) <b>Généralités sur le biogaz</b> (M. Campestrini) AM : Bilan 1 <sup>ère</sup> semaine	9h00-17h00 / Mines Paris M : Travail de groupe AM : Bilan 2 <sup>ème</sup> semaine	9h00-15h00 / Mines Paris M : Présentation des résultats AM : Présentation des résultats / Mines Paris

## DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Dr. Elise El Ahmar

Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines ParisTech

e-mail : [elise.el\\_ahmar@mines-paristech.fr](mailto:elise.el_ahmar@mines-paristech.fr)

Portable : + 33 6 88 08 58 81

Dr. Marco Campestrini

Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines ParisTech

e-mail : [marco.campestrini@mines-paristech.fr](mailto:marco.campestrini@mines-paristech.fr)

Portable : + 33 7 87 18 91 90

Mr. Frédéric Legrand

ENGIE Lab CRIGEN

e-mail : [frederic.legrand@engie.com](mailto:frederic.legrand@engie.com)

Portable : + 33 6 73 57 31 31

## L'EAU APRÈS LA MINE

### Construire et Appliquer les Normes de Qualité des Eaux en Contexte d'Après-Mine

**Coordinateurs :** Irina Sin, Sophie Guillon

**Encadrants :** Irina Sin, Sophie Guillon, Vincent Lagneau, Nicolas Seigneur, Laurent De Windt (Centre de Géosciences)

**Lieux :** Fontainebleau, Paris, Bessines-sur-Gartempe, Limoges

**Intervenants extérieurs :** ORANO Mining, BRGM, IRSN, Régie de l'Eau de Limoges Métropole, Université de Limoges

#### CONTEXTE

En France, la production de ressources minérales indispensables a conduit à la présence sur le territoire d'anciens sites miniers qui doivent être surveillés et gérés afin de limiter les impacts environnementaux.

La définition de bonnes pratiques garantissant de faibles impacts environnementaux est complexe. Elle se situe à l'interface de différentes sphères d'expertise (ingénierie, génie chimique, hydrogéologie, géochimie) et doit prendre en compte les relations entre écosystème, santé, usage de l'eau, territoire et acceptabilité sociale.

La gestion d'un ancien site minier, notamment en ce qui concerne le traitement des eaux, nécessite d'un projet coordonnant les aspects techniques, réglementaires, économiques et sociétaux.

#### RESUME

La définition des normes environnementales pour la qualité des eaux, en particulier pour certains métaux tels que l'uranium, rejetés par d'anciens sites miniers, est un processus complexe qui doit prendre en compte, outre le contexte géologique, les enjeux sanitaires et sociétaux, ainsi que les enjeux économiques.

Du côté des industriels ou des aménageurs, le choix des filières de traitement des eaux de rejet est réalisé en fonction du contexte local de chaque site, du fond géochimique et du terme source pour les éléments chimiques d'intérêt, et de la faisabilité technique et économique sur le long terme.

#### PROBLÉMATIQUE



- Comment définir les normes de la qualité des eaux en conciliant les enjeux de santé, d'acceptabilité sociale, la faisabilité technique et les enjeux économiques pour les industriels ?
  - Faut-il toujours traiter les rejets des anciennes mines ?
- Comment un industriel peut-il gérer de manière optimale la qualité des eaux rejetées sur les anciens sites miniers, en particulier pour l'uranium ?

## OBJECTIFS

- Évaluer l'adéquation entre le fond géochimique de certains éléments et les normes de qualité des eaux en contexte d'après-mine
- Identifier les différents scénarios possibles pour la gestion de la qualité des eaux en contexte d'après-mine (traitements par précipitation, par résines échangeuse d'ions, par atténuation naturelle, ...) dans leurs aspects techniques, mais aussi économiques, environnementaux et sociétaux.

## MINI-PROJETS

### ▪ MP1 MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE

Le site de la Ribière, ancienne mine d'uranium appartenant à ORANO, est proposé comme cas d'étude. Lors de son réaménagement, les résidus miniers provenant de l'usine de traitement ont été stockés sous une couverture de stériles miniers et de terre végétale. Le but de ce MP est de comprendre le fonctionnement hydrogéologique du site. Quels sont les facteurs hydrogéologiques clefs contrôlant le flux d'infiltration d'eau qui rentre à la surface du sol et se rejette dans la rivière qui draine le site ? Comment prédire le ruissellement ? Quels sont les impacts des flux d'eau sur le transport d'uranium à l'exutoire du site ? L'ensemble de ces paramètres seront à intégrer dans un modèle numérique représentatif du site de la Ribière afin de modéliser différents scénarios d'infiltration à long terme.

### ▪ MP2 MODÈLE GÉOCHIMIQUE

La gestion des eaux est une mission importante de l'après-mine. La composition des eaux rejetées par les anciennes mines est régie par des normes réglementaires pour les radioéléments tels que l'uranium et le radium. Il existe différents procédés de traitement des eaux (résines échangeuses d'ions, précipitation, *etc*) qui permettent de diminuer le marquage chimique et radiologique. Dans ce MP, il est proposé de construire des modèles géochimiques afin d'évaluer l'efficacité de différentes méthodes de traitements des eaux, notamment l'évolution des métaux traités mais aussi de ceux utilisés pour le traitement. Pourrait-il être envisagé de ne pas traiter les eaux de rejet d'une ancienne mine ?

### ▪ MP3 MODÈLE RADON

Le radon est un gaz inerte, radioactif produit naturellement dans tout contexte géologique contenant de l'uranium, et notamment dans les sites miniers d'uranium. Le  $^{222}\text{Rn}$  est un produit de désintégration du  $^{226}\text{Ra}$  qui est lui-même produit de  $^{238}\text{U}$ . Dans ce MP, il s'agit de construire des modèles de migration du radon provenant des résidus de traitement à travers les couvertures et le sol, afin de quantifier l'atténuation de ce gaz et de dimensionner l'épaisseur de sol nécessaire à une atténuation suffisante, en utilisant des outils analytiques et numérique.

#### ▪ **MP4 NORMES ET FOND GÉOCHIMIQUE**

Comment sont établies les normes de qualité des eaux? Dans ce MP, il est proposé d'identifier les acteurs et les contraintes de construction des normes de qualité des eaux. Différents aspects doivent être pris en compte : les impacts environnementaux, sanitaires, sociétaux, la faisabilité technique pour appliquer la norme. Le contexte géologique est également un facteur clé à étudier, notamment le fond géochimique naturel et sa variabilité spatiale.

#### ▪ **MP5 ÉVALUATION SOCIO-ÉCONOMIQUE**

Les projets précédents ont permis d'identifier différentes méthodes de traitement des eaux, adaptées aux spécificités des sites miniers et répondant aux objectifs des normes réglementaires. Ce MP a pour objectif d'étudier la faisabilité socio-économique de la mise en place de ces méthodes. Quels sont leurs coûts ? Quel est l'impact financier pour l'industriel ? Ces méthodes ont-elles différents niveaux d'acceptation vis-à-vis de la société, des instances et associations locales ?

#### ▪ **MP6 REVUE INTERNATIONALE & CONSEILS**

De nombreux pays sont ou ont été exploitants d'uranium et doivent faire face à la gestion de leur site après-mine. L'objectif de ce MP est de réaliser un benchmark sur les normes en vigueur à l'internationale et sur les techniques de traitement des eaux des sites miniers d'uranium. Les aspects réglementaires, économiques et sociétaux devront être pris en compte. Quelles recommandations pour le site d'étude de la Ribière ?

### **LES VISITES ET CONFÉRENCES**

- ORANO Mining à Bessines-sur-Gartempe (Limousin)
  - Visite Musée Uréka
  - Conférence ORANO sur l'Après-Mines en France, toutes les étapes de réaménagement et la surveillance des anciens sites miniers uranifères
  - Visite de l'ancienne mine à ciel ouvert de Bellezane, réaménagée depuis 1997
  - Visite de l'ancienne mine de la Ribière, réaménagée depuis 1992
- Station de traitement de l'eau potable, Limoges Métropole
- Conférence à l'Université de Limoges sur les métaux dans les sédiments
- Conférence de l'IRSN sur les normes de qualité des eaux
- Conférence du BRGM Après-Mine sur le traitement des eaux de rejet de mines

### **ORGANISATION**

Cette formation sera réalisée en 3 semaines du lundi 16 novembre au vendredi 4 décembre 2020. La semaine 1 sera consacrée à l'acquisition des connaissances en s'appuyant essentiellement sur des conférences et des visites d'installations et des échanges avec les partenaires industriels et institutionnels. 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 trois premières journées seront consacrées aux mini-projets

4 à 6, et les deux dernières à la synthèse des travaux et à la préparation de la restitution écrite des résultats du MIG.

### PROGRAMME PREVISIONNEL

#### Semaine 1 du 16 Novembre 2020

Jour/ Emplacement	Programme : Matin / Après-midi	
Lundi 16/11 Paris → Fontainebleau → Bessines	- Introduction Générale aux Problématiques de l'Après-Mine, Orano R&D, Environnement (M. Descostes, C. Chautard) - Présentation des visites/conférences	Départ vers Bessines
Mardi 17/11 Bessines, Bellezane	- Musée Uréka - Problématiques Après-Mines (G. Kern) - Procédés de traitement utilisés à l'après-mines (J. Schick)	- Bellezane (G. Kern) - Station de traitement des eaux d'Augères (J.Schick)
Mercredi 18/11 La Ribière	- Visite du site de la Ribière (C.Benesteau) (site réaménagé, résidus, stériles, traitement des eaux)	
Jeudi 19/11 → Limoges → Fontainebleau, Paris	- Station de traitement de l'eau potable de Limoges Métropole	- Université de Limoges, V. Robin
Vendredi 20/11 Paris	- IRSN (I. Dublineau, P. Blanchart)	- BRGM Après-Mine (J-D Barnichon)

#### Semaine 2 du 23 Novembre 2020, Bat A Salles 201, 202 et R02, Fontainebleau

Jour	Programme : Matin / Après-midi	
Lundi 23/11	- Introduction des MP 1, 2 et 3 - Cours Non-saturé, Transport Réactif	Réalisation des MP 1-3 menés par groupes en parallèle. Compléments d'information technique et scientifique par groupes de projet.
Mardi 24/11	- Cours de géochimie	Séance sur la recherche documentaire à la bibliothèque de Fontainebleau
Mercredi 25/11	MP 1-3	
Jeudi 26/11		
Vendredi 27/11	Synthèse des MP 1-3, coordination des résultats Introduction des MP 4, 5 et 6 qui sont en lien avec les MP 1, 2 et 3	

#### Semaine 3 du 30 Novembre 2020, Bat A Salles 201, 202 et R02, Fontainebleau

<i>Jour</i>	<i>Programme : Matin / Après-midi</i>
<i>Lundi 30/11</i>	<i>Réalisation des MP 4-6 menés par groupes en parallèle. Compléments d'information technique et scientifique par groupes de projet.</i>
<i>Mardi 1/12</i>	
<i>Mercredi 2/12</i>	
<i>Jeudi 3/12</i>	<i>Synthèse des MP Préparation de la restitution des MP, ébauche de rédaction et préparation de la restitution.</i>
<i>Vendredi 4/12</i>	<i>Restitution des MP Préparation du plan du rapport final</i>

## CONTACTS

- [irina.sin@mines-paristech.fr](mailto:irina.sin@mines-paristech.fr) Tél. 01 64 69 48 12
- [sophie.guillon@mines-paristech.fr](mailto:sophie.guillon@mines-paristech.fr) Tél. 01 64 69 47 48
- [brigitte.breda@mines-paristech.fr](mailto:brigitte.breda@mines-paristech.fr) Tél. 01 64 69 47 10 (assistante)

## NOUVELLES MOBILITES ELECTRIQUES : VEHICULES A BATTERIE ET A HYDROGENE

Encadrants : Pedro AFFONSO NOBREGA et Robin GIRARD

Centres de recherche concernés : PERSEE

Lieux : Paris, Sophia-Antipolis

### RESUME :

L'objectif de ce MIG est d'offrir une comparaison des véhicules électriques à batterie et à hydrogène, deux alternatives pour l'électrification des transports. Nous regarderons, en plus des efficacités énergétiques respectives, des aspects comme impacts sur le réseau électrique et le couplage avec les énergies renouvelables, la question des matériaux, les infrastructures de recharge, les différentes contraintes d'usage, etc. Nous souhaitons ainsi vous permettre d'aborder le problème de la mobilité électrique dans sa globalité et de façon quantitative, en prenant conscience des avantages et inconvénients de chaque technologie.

Pour cela, la première semaine sera dédiée à des interventions d'enseignants, chercheurs et acteurs de l'industrie. Une première journée d'introduction sera dédiée à des rappels d'électrochimie et aux fondements des batteries, des piles à combustible et de l'électrolyse. La deuxième journée sera dédiée aux véhicules électriques, avec notamment des interventions d'acteurs de l'industrie qui donneront leur vision sur les véhicules à batterie et à hydrogène. La troisième journée sera dédiée aux infrastructures de recharge, à la question de la mobilité longue distance et aux impacts sur le système électrique. Le quatrième jour, nous visiterons le site industriel de SYMBIO, fabricant français de systèmes piles à combustible pour la mobilité, situé à Fontaine (38), avant de nous diriger vers Sophia-Antipolis pour les deux semaines suivantes, dédiées aux mini-projets.

### CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

Depuis quelques mois, l'offre de véhicules électriques à batterie s'élargit et il est de plus en plus courant de croiser des voitures électriques sur nos routes. Poussés par des réglementations de l'Union Européenne plus contraignantes en termes d'émissions, tous les grands industriels de l'automobile ont désormais des modèles électriques sur leur catalogue. Le plan de soutien à la filière automobile française, présenté par le gouvernement français fin mai, va aussi dans le sens d'une électrification de la flotte de véhicules particuliers et d'une réorientation de la filière

vers de véhicules « propres ». Côté performance, les progrès sur les batteries permettent d'augmenter progressivement les autonomies et/ou baisser les prix.

D'un autre côté, l'hydrogène est devenu le vecteur énergétique à la mode. S'il s'agit d'une technologie moins mature, les véhicules électriques à hydrogène commencent à se faire un chemin, notamment pour la mobilité lourde et les véhicules utilitaires. Pour les véhicules particuliers, seulement deux modèles sont aujourd'hui commercialisés en France (Toyota Mirai et Hyundai Nexa), mais le prix élevé et l'infrastructure de recharge quasiment inexistante restent des obstacles à une adoption plus large.

Dans ce contexte, nous pouvons nous demander à quoi ressemblera la mobilité électrique de demain ? Les véhicules à batterie domineront seuls le marché ? Est-ce que les véhicules à hydrogène peuvent être une alternative sérieuse, au-delà du « buzz » ? Quelles sont les implications d'une forte pénétration des véhicules électriques (impacts sur le système énergétique, usage de matériaux, infrastructures de recharge ...) ?

#### **OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :**

Comprendre les technologies de stockage d'énergie à batterie et à hydrogène pour les véhicules électriques particuliers. Identifier leurs avantages et inconvénients, évaluer quantitativement ses performances et impacts divers.

#### **MINI-PROJETS**

##### **Impact sur le réseau de l'électrification des véhicules**

Le but de ce projet c'est d'évaluer l'impact sur le réseau électrique d'une adoption à large échelle de véhicules électriques et étudier quelques cas limites à définir : chassé-croisé de vacances à l'autoroute ? journée très froide ?

##### **Impact de l'électrification sur la demande énergétique d'un territoire**

Le but de ce projet est d'évaluer les besoins d'un territoire en termes de stations de recharge et stations de remplissage H2 en fonction d'hypothèses sur le nombre de véhicules et les types d'usage (nombre de trajets, km parcourus, etc.). Il sera intéressant d'estimer le CAPEX et les OPEX totaux, les besoins associés en termes d'approvisionnement en H2 et électricité supplémentaires (hypothèses sur production H2 centralisée ou pas, forme de production, etc.). Mise en perspective par rapport aux flux énergétiques actuels (électricité, combustibles fossiles, etc.) et le coût du réseau de stations-service classiques en place. Application à un cas d'étude.

##### **Hybridation batterie-pile à combustible**

Le but de ce projet c'est d'évaluer les différentes possibilités d'hybridation dans le continuum qui va d'un véhicule 100% batterie à un véhicule 100% pile à combustible (théorique), en passant par des prolongateurs d'autonomie. Evaluer le coût, l'usage de matériaux, l'autonomie, etc. en fonction du "taux d'hybridation".

##### **Outil calcul de coût et impact environnemental des véhicules électriques**

Le but de ce projet serait de développer un outil qui permette à une personne d'estimer le coût total de possession (*total cost of ownership*, TCO), ainsi que les impacts environnementaux, de véhicules essence, diesel, électriques à batterie, FC ou hybrides. Cet outil prendrait en considération des hypothèses sur l'usage et aiderait une éventuelle prise de décision d'achat.

### **LES VISITES**

- SYMBIO - site de Fontaine (38)
- Laboratoire Pile à Combustible - centre PERSEE (06)

*(D'autres à confirmer...)*

### **LES INTERVENANTS**

Pedro AFFONSO NOBREGA (Enseignant-Chercheur – Centre PERSEE)

Christian BEAUGER (Enseignant-Chercheur – Centre PERSEE)

Robin GIRARD (Enseignant-Chercheur – Centre PERSEE)

Charlotte GERVILLIE (Chercheur – Collège de France)

Fabio FERRARI (Fondateur – SYMBIO)

Jean-Luc BROSSARD (Directeur R&D – PFA)

Yorick LIGEN (Resp. Ingénierie – Seabubbles)

Raphaël VENTRE (Directeur Services Mobilité Routière – VINCI Autoroutes)

*(D'autres à confirmer...)*

### **PROGRAMME PREVISIONNEL**

#### **Semaine 1**

##### *Lundi 16/11*

- Introduction générale et contexte
- Rappels d'électrochimie
- Introduction aux batteries
- Introduction aux piles à combustible
- Introduction à l'électrolyse

##### *Mardi 17/11*

- Véhicules à batterie : enjeux et perspectives
- Véhicules à hydrogène : enjeux et perspectives
- Systèmes de propulsion des véhicules
- Architecture électrique des véhicules à hydrogène

##### *Mercredi 18/11*

- Structures de recharge électrique et hydrogène
- Mobilité longue distance : enjeux et obstacles
- Mobilité électrique : impacts sur le système électrique

##### *Jeudi 19/11*

- Visite du site de Fontaine (38) de SYMBIO

##### *Vendredi 20/11*

- Arrivée à Sophia-Antipolis, visite du Laboratoire Pile à Combustible

### **Semaines 2 et 3**

Travail sur les mini-projets.

### **DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)**

Les trois premiers jours se dérouleront à Paris, sur le site de l'École. Le quatrième jour, nous prendrons le train vers Grenoble pour la visite du site de SYMBIO à Fontaine. De là, nous rejoindrons Sophia-Antipolis, où vous serez logés dans une résidence étudiante reliée au site de l'École par une ligne de bus régulière. Vous serez logés en appartement de 2 à 4 personnes, draps et serviettes seront fournies, et les appartements sont équipés d'une cuisine.

### **Contact**

pedro.affonso\_nobrega@mines-paristech.fr  
robin.girard@mines-paristech.fr



## RESSOURCES MINERALES – EXTENSION D'UNE EXPLOITATION SOUTERRAINE DE GYPSE DANS LA REGION PARISIENNE

*En partenariat avec PLACO (Saint Gobain)*

**Coordinateurs :** Faouzi Hadj-Hassen et Isabelle Thénevin,

**Encadrants:** Faouzi Hadj-Hassen, Isabelle Thénevin, Bruno Tessier, Damien Goetz, Michel Duchêne, Hedi Sellami et Emmanuel Ledoux

**Centre de recherche concerné :** Géosciences

**Lieux :** Fontainebleau, Paris et Ile de France

**Contacts :**

---

Faouzi Hadj-Hassen	01.64.69.48.25	faouzi.hadj_hassen@mines-paristech.fr
Isabelle Thénevin	01.64.69.48 96	isabelle.thenevin@mines-paristech.fr

---



Carrière souterraine de gypse de Bernouille (source Placo)

### 1. Contexte et problématique

Une part majoritaire des ressources géologiques en substances de carrières est exploitée pour la production de granulats mais aussi pour la fabrication de matériaux de construction destinés aux secteurs du bâtiment et des travaux publics (ciment, béton, plâtre, chaux, verre, roches ornementales...). Les besoins en granulats en France représentent une consommation de l'ordre de 6 tonnes/an par habitant. L'Ile de France est l'une des régions les plus consommatrices de ces matériaux avec un chiffre d'affaire en 2017 de l'ordre de 920 M€.

Doté de nombreux atouts : isolant thermique, régulateur de l'hygrométrie, résistant au feu et excellent isolant acoustique, le plâtre s'est imposé comme un produit incontournable pour la construction durable. Il est fabriqué à partir du gypse qui est une roche sédimentaire

provenant de l'évaporation de l'eau de mer en milieu lagunaire. En France, les gisements exploitables sont estimés à 350 Mt, dont près de 70% se situent dans le bassin parisien. 5.2 Mt de [gypse](#) sont extraites chaque année pour approvisionner l'industrie du plâtre (80 % du volume), du ciment (15 %), des engrais agricoles (5 %), de la céramique ou encore de l'industrie médicale et dentaire.

La grande pureté du gypse francilien a fait la réputation mondiale du "plâtre de Paris". Il s'est formé en plusieurs couches séparées par des horizons intercalaires marneux de 3 à 4 m d'épaisseur. La dernière couche de gypse, dite première masse, a une puissance entre 10 et 20 m. Les couches inférieures, dites deuxième et troisième masses, sont moins épaisses avec respectivement 6 à 10 m et 3 à 4 m de puissance. 90% de la ressource francilienne n'est pas accessible du fait de l'urbanisation et de grandes infrastructures.

Les principales exploitations de gypse francilien sont aujourd'hui les carrières à ciel ouvert de [Cormeilles-en-Parisis](#) (Val d'Oise), [Le Pin-Villeparisis](#) (Seine et Marne) et les carrières souterraines sous le massif de [Montmorency](#) (Val d'Oise) et celle du [Bois de Bernouille](#) (Seine Saint Denis).

## **2. Objectifs et organisation**

La carrière souterraine de gypse de Bernouille est actuellement en train de puiser ses dernières réserves de gypse au niveau de la première masse malgré l'extension de l'exploitation vers le secteur sud effectuée en 2017. Afin de pérenniser l'approvisionnement en matière première de l'usine de Vaujours, située à proximité de la carrière et constituant le premier complexe de transformation de gypse dans le monde, un projet d'exploitation de la deuxième masse de gypse est en cours d'étude.

Les enjeux à prendre en compte pour l'exploitation d'une ressource minérale deviennent de plus en plus nombreux : urbanisation, zones ou espèces protégées, conflits d'usage, oppositions locales, livraison, etc. Ces enjeux rendent difficile le renouvellement des autorisations. Cette situation est d'autant plus difficile que l'on se trouve dans une région aussi congestionnée que l'Ile de France.

Le MIG proposé consiste à étudier la faisabilité de l'exploitation de la deuxième masse de gypse dans la carrière souterraine de Bernouille, notamment au niveau du quartier de Zinetti. Il s'agit de traiter tous les aspects liés à ce projet en analysant à la fois les volets techniques : infrastructure d'accès, dimensionnement géotechnique pour garantir la stabilité des ouvrages à long terme, méthode d'abattage, aérage des travaux souterrains, ainsi que les volets réglementaire, environnemental, sociétal et économique : impact sur le régime hydrogéologique, sur l'environnement et l'écosystème, acceptabilité sociétale et évaluation économique de la rentabilité du projet.

### **2.1 Contenu des mini-projets**

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

#### **1. La carrière souterraine de Bernouille et le projet de développement (Bruno Tessier, Isabelle Thévenin et Emanuel Ledoux)**

Les derniers panneaux de la carrière souterraine de Bernouille sont en fin d'exploitation et le projet de récupération de la deuxième masse a été délimité. Le mini-projet consiste à décrire les conditions actuelles générales de l'exploitation et à caractériser les secteurs concernés par le projet d'extension. Cela concerne la géologie du gisement, l'historique d'exploitation et la méthode utilisée, le projet d'extension et l'évaluation des nouvelles réserves. Ce travail doit

aboutir aussi à la définition de la méthode à mettre en œuvre pour l'exploitation de la deuxième masse de gypse ainsi que l'infrastructure nécessaire d'accès.

## **2. Dimensionnement géotechnique du projet d'extension (Faouzi Hadj-Hassen)**

En s'appuyant sur les conditions de l'exploitation actuelle ainsi que sur les données acquises sur les nouveaux secteurs du projet d'extension concernant la géologie des terrains, les épaisseurs, les profondeurs et les caractéristiques mécaniques des masses de gypse et des formations marneuses, une étude géotechnique sera menée pour dimensionner les ouvrages de la méthode d'exploitation retenue. Cela porte sur les dimensions des chambres et des piliers, la superposition des travaux des deux niveaux d'exploitation, stot entre les deux masses de gypse, les planches de gypse à abandonner au toit et au mur et enfin les moyens de renforcement nécessaires pour garantir la stabilité à long terme de l'exploitation (boulonnage et grillage du toit des chambres et remblayage postérieur en plusieurs phases).

## **3. Abattage minier et aérage des travaux souterrains (Michel Duchêne, Hedi Sellami et Damien Goetz)**

Outre l'aspect géotechnique, deux autres volets techniques de l'exploitation souterraine seront traités dans ce mini-projet : l'abattage minier et l'aérage. Pour le premier, il s'agit de faire le choix entre l'abattage à l'explosif et l'abattage mécanique, voire même une combinaison des deux méthodes en fonction des conditions de l'exploitation. En ce qui concerne l'aérage, il faut vérifier si le circuit actuel permet de répondre aux besoins des nouveaux secteurs moyennant des ouvrages supplémentaires ou si un nouveau design doit être effectué.

Ce mini-projet comprend aussi la définition des équipements à mettre en œuvre pour garantir la production escomptée.

## **4. Etude hydrogéologique (Emmanuel Ledoux et Bruno Tessier)**

Le contexte hydrogéologique de la région parisienne notamment dans la zone concernée par la carrière souterraine sera étudié. L'impact de la récupération de la deuxième masse de gypse sur le régime hydrogéologique et la qualité des aquifères ainsi que les risques encourus suite à une instabilité mécanique de l'exploitation souterraine seront aussi évalués.

## **5. Cadre législatif, sociétal et environnemental (Isabelle Thénevin et Placo)**

Le développement d'une carrière à ciel ouvert ou en souterrain dans une région aussi congestionnée que celle de l'Ile de France nécessite un suivi attentif de l'administration pour permettre le déroulement de l'exploitation dans des conditions satisfaisantes. Le cadre législatif sera ainsi rappelé et les aspects sociétal et environnemental seront traités. L'impact de l'exploitation sur l'environnement et l'écosystème concerne les bruits, les vibrations le flux des engins, la faune et la flore. L'acceptabilité sociétale sera traitée en collaboration avec la société en charge de l'exploitation en analysant les données disponibles sur des enquêtes publiques, l'intérêt que présente le projet en termes d'emploi et de création de vides pouvant contenir des déblais de terrassement liés à des projets de type Grand Paris par exemple.

## **6. Evaluation économique du projet d'extension de la carrière (Damien Goetz et Faouzi Hadj-Hassen)**

A partir des éléments mis en évidence dans les autres mini-projets, il s'agit de développer un modèle économique (investissement initial pour le développement du projet, coût opératoire, recettes liées à l'exploitation) pour pouvoir évaluer l'intérêt d'un tel investissement et éventuellement comparer les variantes d'extension possibles (valeur actuelle nette et taux de rentabilité interne).

Des études de sensibilité seront ensuite menées pour mettre en évidence les paramètres qui pourraient mettre en péril la rentabilité du projet, et qui nécessiteraient donc des analyses plus approfondies.

## 2.2 Organisation

Cette formation sera réalisée en 3 semaines du lundi 16 novembre au vendredi 4 décembre 2020. La semaine 1 sera consacrée à l'acquisition des connaissances en s'appuyant essentiellement sur des conférences et des visites d'installations et des échanges avec les partenaires industriels et institutionnels. 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 de la restitution écrite des résultats du MIG.

### Semaine 1

Lundi 16/11 Paris	- Présentation du MIG (F. Hadj-Hassen) - Géologie du bassin parisien et carrières de matériaux de construction (I. Thévenin) - Visite de la DREE Paris
Mardi 17/11 Paris et Corneilles	- La filière du gypse (Placo) - Visite de la carrière de Corneilles ou de Montmorency (Placo)
Mercredi 18/11 Bernouille	- Visite de la carrière de Bernouille et de l'usine de plâtre (Placo)
Jeudi 19/11 Paris	- Economie des projets miniers (D. Goetz) - Séance recherche documentaire - Visite des travaux souterrains du Grand Paris
Vendredi 20/11 Paris	- Visite de l'Inspection Générale des Carrières (IGC, Paris)

### Semaine 2

Lundi 23/11 <i>Fontainebleau</i>	Réalisation des mini-projets 1 à 3 menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 24/11 <i>Fontainebleau</i>	
Mercredi 25/11 <i>Fontainebleau</i>	
Jeudi 26/11 <i>Fontainebleau</i>	
Vendredi 27/11 <i>Fontainebleau</i>	Synthèse des mini-projets 1 à 3, coordination des résultats en vue des mini-projets 4 à 6.

### Semaine 3

Lundi 30/11 <i>Paris</i>	Réalisation des mini-projets 4 à 6 menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 01/12 <i>Paris et Fontainebleau</i>	
Mercredi 02/12 <i>Paris et Fontainebleau</i>	
Jeudi 03/12 <i>Paris et Fontainebleau</i>	
Vendredi 04/12 <i>Paris</i>	Restitution des mini-projets 4 à 6 Préparation du plan du rapport final

## **Référence**

<https://www.placoplatre.fr/L-ENTREPRISE/Carrieres-de-gypse>

<https://www.unicem.fr>

Ces derniers mois ont vu apparaître un phénomène inédit dans le domaine de la santé. En à peine quelques mois, la pandémie de COVID-19 s'est développée sur l'ensemble du globe, touchant plus de X millions de personnes et à l'origine de XXX décès.

Cette maladie nouvelle, le plus souvent bénigne, présente cependant un taux de mortalité non négligeable (de l'ordre de 1.5%), principalement chez des personnes âgées ou atteints de pathologies chroniques. Nous avons assisté, en raison de la dissémination extrêmement rapide de l'épidémie, à une saturation des systèmes de santé et à une paralysie temporaire du monde social et économique, encore fragilisé par cet événement sans précédent.

Des moyens considérables pour comprendre les mécanismes de la maladie et de ses complications et élaborer des stratégies thérapeutiques ont été mis en oeuvre dans le monde entier et se poursuivent à un rythme également inédit. Cependant, la pandémie a représenté un défi pour les médecins et le personnel de santé (hôpitaux, EPAHDs, médecine de ville,...), mais plus globalement, a soumis à dure épreuve le système de santé, qui a dû trouver des solutions rapidement efficaces pour faire face à l'augmentation exponentielle du nombre de patients atteints de Covid-19 et la durée initialement considérable de leur séjour à l'hôpital (3 semaines ?).

De ce point de vue, un des problèmes rencontrés est de permettre aux hôpitaux de se concentrer sur les patients fragiles et les plus gravement atteints, tout en renvoyant chez eux les patients ne présentant pas de signe de gravité, mais en maintenant une surveillance médicale, sachant qu'une aggravation apparaît dans 10 à 15 % des cas.

Des solutions innovantes ont été mises en place permettant à l'hôpital d'absorber l'afflux de patients sévères, y compris dans les services de réanimation et d'assurer la surveillance en ville des patients les moins sévères. Certaines de ces solutions reposent essentiellement sur l'implication sans faille du personnel soignant, d'autres reposent sur des dispositifs organisationnels plus complexes et faisant appel aux nouveaux dispositifs de télésanté. C'est le cas notamment du dispositif COVIDOM de télésurveillance médicale centralisée, d'alerte et d'orientation, élaboré en concertation avec différents acteurs du domaine de la santé, mettant en jeu médecine de ville et hôpital, et mis en fonction pendant la crise.

Le sujet demandé aux élèves par les Dr Alexandre Bleibtreu et Aurélien Dinh, respectivement infectiologues aux hôpitaux de la Pitié-Salpêtrière et Ambroise Paré, est, à partir d'une analyse du projet COVIDOM et de son efficacité, étudier la possibilité de prolonger cette approche en dehors d'une situation de crise sanitaire afin si possible (dans quelle mesure et dans quelles conditions) d'en déduire un outil exploitable pour d'autres circonstances et d'autres pathologies.

Dans leur étude, les élèves devront également aborder certains autres aspects du sujet :

- Evaluer les conséquences sur la santé publique de la crise du Covid-19, en dehors des patients touchés par l'infection : quelles répercussions cette crise a-t-elle eu chez les patients « non-covid » pendant cette période et au-delà ? Peut-on envisager des moyens pour les prévenir ? Si oui, lesquels ?
- Peut-on faire une analyse des ressources humaines, techniques, institutionnelles et financières mobilisées pour la mise en oeuvre du dispositif COVIDOM ? Une analyse coût économique d'un dispositif pérenne est-elle possible ?

Les élèves seront amenés à rencontrer pendant la période de MIG (première semaine environ) des acteurs variés du domaine : médecins spécialistes, généralistes, acteurs institutionnels (APHP, ARS, ...),...

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.

Le MIG comprendra visites (au sein de services hospitaliers) et conférences. Les intervenants sont impliqués depuis de nombreuses années dans les différents aspects de l'infectiologie. Ils vous feront accéder aux éléments essentiels vous permettant de répondre aux questions posées.

Les aspects fondamentaux, médicaux, épidémiologiques seront couverts par les différents intervenants.

**Le programme complet et le calendrier des conférences et visites seront communiqués ultérieurement.**



## MIG SOLAIRE

### Domaine du Rayol : capter les énergies du Jardin des méditerranées pour amorcer et mettre en paysage sa transition énergétique et écologique

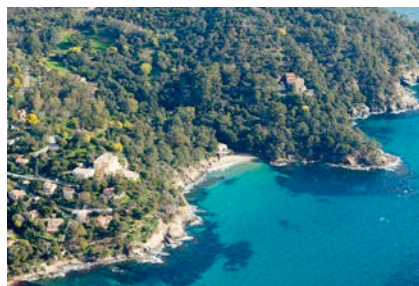
**Coordinateurs :** Philippe BLANC

**Encadrants :** Joris MASAFONT (doctorant ADEME, Ecole Nationale Supérieure de Paysage de Versailles, MINES ParisTech), Mélanie DOUZIECH (enseignante-chercheuse)

**Centres de recherche concernés :** Observation, Impacts, Energie

**Autres institutions participantes :**

L'Ecole Nationale supérieure de paysage de Versailles-Marseille et sa chaire Energie



et Paysage et l'Ecole de la Nature et du Paysage de Blois (INSA CVL)

**Lieux :** Domaine du Rayol (Rayol-Canadel-sur-Mer, 83), Sophia Antipolis (06)

**RESUME :** Pour contribuer aux défis de la transition énergétique et écologique, le MIG SOLAIRE va s'intéresser au site d'exception

qu'est le domaine du Rayol dans le département du Var. Ce site souhaite (1) produire à partir de ses propres ressources renouvelables de façon à subvenir à toute ou partie de ses besoins énergétiques évalués et ramenés au plus juste et (2) de mettre en scène ces captations de façon à être une source d'inspiration pour la transition énergétique et écologique. Avec l'aide de l'Ecole Nationale supérieure de paysage de Versailles-Marseille et de l'Ecole de la Nature et du Paysage de Blois (INSA CVL) et de la chaire Paysage et Energie, les élèves-ingénieurs du MIG croiseront leurs regards avec des élèves-paysagistes. Lors d'ateliers en commun, ils mêleront sciences, ingénierie, paysagisme mais aussi design et arts pour proposer et même expérimenter des solutions efficaces et esthétiques et porteuses de sens pour accompagner le domaine dans sa transition.

#### CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

Lieu démonstrateur des pensées du paysagiste de renommée internationale Gilles Clément, le Domaine du Rayol, propriété du Conservatoire du Littoral, partage depuis plus de 30 ans de nombreuses valeurs portées par l'esprit du jardin comme celles relatives à l'écologie, au paysage, à l'ouverture au monde. Le domaine souhaite entamer une transition énergétique et écologique en cherchant l'efficacité énergétique et en étant producteur d'énergies renouvelables pour couvrir toute ou partie de ses besoins.



Les enjeux sont les suivants :

- Comment capter les ressources renouvelables locales du domaine pour contribuer significativement à ses besoins énergétiques et hydrauliques de fonctionnement ?
- Comment mêler sciences, ingénierie, paysagisme, design et art pour atteindre cet objectif ?
- Comment mettre en scène ces énergies pour que le domaine du Rayol devienne aussi un lieu inspirant de la transition énergétique et écologique ?

#### **OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :**

Ce MIG n'est pas organisé en mini-projets : aidés par une introduction à la méthodologie LEAN, les étudiants des différentes écoles (Ecole des Mines et Ecoles de Paysage) trouveront par eux-mêmes une organisation du travail pour mener à bien ce projet, en croisant leurs regards et disciplines, avec le support et l'expertise d'encadrants de l'Ecole des Mines mais aussi de deux Ecoles de Paysages. Après une phase de diagnostic sur les besoins et les ressources énergétiques renouvelables et hydrauliques du domaine de 12 ha, le projet visera une intégration des solutions avec trois exigences : l'intégration paysagère, l'intégration avec le réseau électrique ENEDIS et l'intégration dans l'animation pédagogique et touristique du site.

#### **LES VISITES, CONFERENCES, RENCONTRES**

Compte tenu de la situation sanitaire relatif au COVID, les visites et les déplacements sont sujets aux aléas.

- Conférence sur la transition énergétique et écologique ;
- Conférences sur la sensibilisation à la notion de paysage ainsi qu'à l'approche paysagère ;
- Présentation des travaux de la chaire Paysage et Energie ;
- Cours d'introduction à la ressource solaire et à son exploitation ;
- Cours d'introduction aux méthodes d'organisation de travail en groupe (LEAN) ;
- Cours d'introduction sur les impacts environnementaux et la durabilité ;
- Visites d'infrastructures énergétiques (centrale nucléaire, centrale photovoltaïque) ;
- Visite du site PROMES à Odeillo (recherche sur la concentration solaire) ;
- Visite de Thales Alenia Space, à Cannes ;
- Visite du Parc Naturel Régional (PNR) des Préalpes d'Azur.

#### **DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)**

Dans l'idéal, le projet se déroulera dans une première phase sur le site du domaine du Rayol et, dans une deuxième phase, sur le site de l'Ecole à Sophia Antipolis (06).

- J1-2 : descente dans le Sud avec visites liées à des infrastructures énergétiques
- J3 : conférences introductives sur le site du domaine du Rayol
- J4-8 : ateliers avec les différentes Ecoles
- J9 : déplacement sur Sophia Antipolis et visites (CNIM, PNR, Thales)
- J10-12 : continuation des ateliers sur Sophia
- J15-18 : finalisation, synthèse, rédaction
- J19 : première restitution orale (avant janvier)

#### CONTACTS :

- Philippe BLANC (philippe.blanc@mines-paristech.fr, +33 (0)6 60 65 01 50)
- Mélanie DOUZIECH (melanie.douziech@mines-paristech.fr)
- Joris MASAFONT (joris.masafont@hotmail.fr)

## MIG - TRANSPORT DE L'HYDROGENE

**PROGRAMME PREVISIONNEL**

Jours	Semaine 1 (du 16/11 au 20/11)	Semaine 2 (du 23/11 au 27/11)	Semaine 3 (du 30/11 au 04/12)
<b>Lundi</b>	9h30-17h30 / Mines Paris** M : Présentation du projet et Conférence introduction d'ENGIE AM : Place des <b>gaz verts</b> dans la transition énergétique, enjeux et usages des gaz verts (F. Legrand)	9h30-17h00 / Mines Paris (F. Legrand)** -Déroulement d'un programme de recherche : du brevet à la mise en place de la technologie dans un projet industriel -Déroulement d'un projet industriel : du devis au démarrage de l'installation	Mini-projets
<b>Mardi</b>	Visite Mannesmann	Mini-projets ou usine de production de tubes (Y. Madi, J. Besson)	Mini-projets
<b>Mercredi</b>	Visite du centre de recherche PERSEE Sophia-Antipolis. (J. Besson – J. Crépin – Y. Madi)	Mini-projets	Mini-projets
<b>Jeudi</b>	9h30-17h00 / Mines Paris <b>Hydrogène</b> (F. Legrand)** Modes de production, Marché actuel Projection du marché et des usages	Mini-projets	Mini-projets
<b>Vendredi</b>	9h30-17h30 / Mines Paris Utilisation du réseau gazier existant pour le transport de l'hydrogène (GRTgaz)	Mini-projets	9h00-15h00/ CDM M : Présentation des résultats AM : Présentation des résultats / Mines Paris

\*\* : en commun avec le MIG « gaz verts »