



DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE L'ENSEMBLE DES PROJETS MIG [2023-2024]

CYCLE INGENIEURS CIVILS

UE 15 : 1er semestre /2023-2024

SOMMAIRE

P.2	MIG R-SOURCES
P.7	MIG BIOGAZ
P.11	MIG OPTIM AERO
P.15	MIG ALEF
P.18	MIG SOLAIRE
P.20	MIG OCEAN
P.23	MIG MODE & LUXE
P.25	MIG LITHIUM
P.27	MIG VERRE & MECA

ETUDE PROSPECTIVE D'UNE RESSOURCE STRATEGIQUE : L'EXPLOITATION EN SOUTERRAIN DU GYPSE DANS LA MAURIENNE

Coordinateurs : Faouzi Hadj Hassen et Isabelle Thénevin (Géosciences)

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

Centre de recherche concerné : Centre de Géosciences

Lieu : 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau, France

RESUME

Le gypse de la carrière de Saint-Jean-de-Maurienne est exploité à ciel ouvert et sert à alimenter le complexe industriel plâtrier de Chambéry ainsi que les cimenteries régionales. La carrière a atteint ses limites autorisées et son extension à ciel ouvert s'avère impossible pour des raisons essentiellement environnementales. La poursuite de l'exploitation de cette ressource, classée maintenant stratégique, fait face à de nombreux écueils. Une des solutions envisagées par Placoplatre serait, à moyen terme, de développer des techniques d'extraction des gisements identifiés en souterrain. Le gisement du Mont Charvin constitue un bon exemple d'accumulation de contraintes inconciliables, à causes desquelles il paraît irréalisable d'y ouvrir une carrière à ciel ouvert. Cependant, les conditions géologiques et géotechniques difficiles du gisement, d'une part, et les oppositions locales, d'autre part, constituent de vrais obstacles à son développement. Le MIG se propose de mener une étude prospective sur la faisabilité de l'extension en souterrain de l'exploitation sur ces terrains. Il s'agit de traiter tous les aspects de ce projet à la fois techniques : caractéristiques géologiques et géotechniques, réserves exploitables, infrastructures d'accès, stabilité à long terme des ouvrages, méthode d'abattage, aération des travaux souterrains, ainsi que les aspects environnementaux et socioéconomiques : impact sur le régime hydrogéologique, l'environnement et l'écosystème, acceptabilité sociale et évaluation économique.

1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

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...). Doté de nombreux atouts : isolant thermique, régulateur de l'hygrométrie, résistant au feu et 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 l'industrie médicale et dentaire.

La carrière à ciel ouvert de Saint-Jean-de-Maurienne est située à flanc de montagne sur 300 m de dénivelé et s'étend sur une superficie de 41 ha sur les deux communes de Saint-Jean-de-Maurienne et de Saint-Pancrace en Savoie (Figure 1). Son exploitation a commencé en 1981 avec actuellement une production annuelle de gypse et d'anhydrite de l'ordre de 280 000 t.

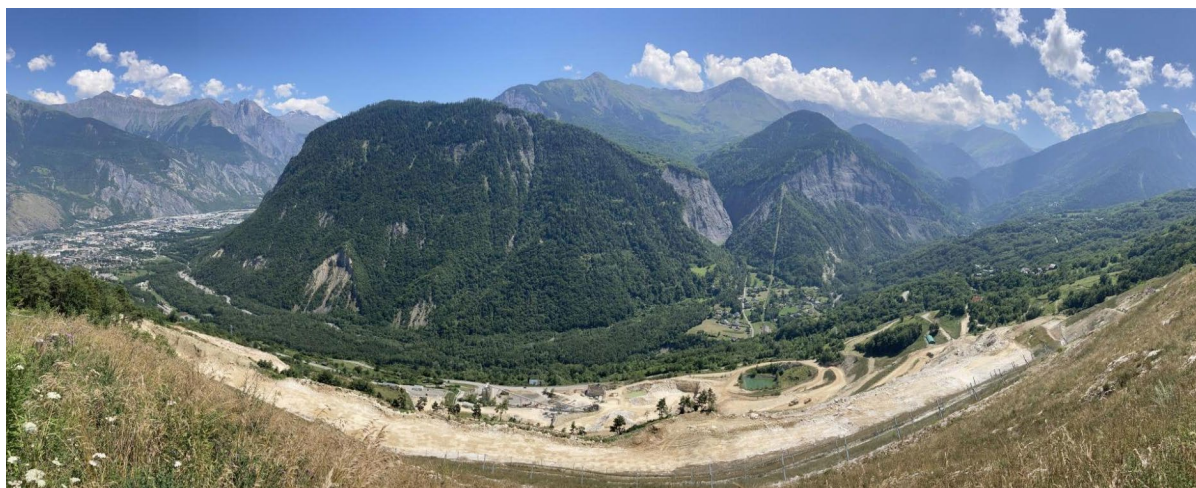


Figure 1 : Vue de la carrière de gypse de Saint-Jean-de-Maurienne

Deux techniques d'exploitation sont pratiquées dans cette carrière : la méthode traditionnelle en fronts et gradins sur la partie basse, et la méthode en plan incliné sur la partie supérieure pour tenir compte de contraintes géotechniques spécifiques. Ce dernier mode nécessite de commencer l'extraction par le sommet en respectant une pente d'un angle maximum de 38°. L'extraction du gypse est alors réalisée à la fois par tir à l'explosif et mécaniquement.

La carrière arrive bientôt à ses limites autorisées et la question de son extension se pose de façon très aigüe. Compte tenu de la sensibilité de la région qui comprend un parc national, 4 sites classés en protection de biotope et 8 sites Natura 2000, la poursuite de l'exploitation à ciel ouvert s'avère très difficile et se trouve confrontée à une opposition locale très forte. La seule alternative qui permettrait d'assurer l'accès à cette ressource et garantir ainsi la pérennité d'approvisionnement du complexe industriel plâtrier de Chambéry serait d'envisager une exploitation souterraine.

L'activité tectonique des Alpes a conduit à la formation d'un gisement avec des caractéristiques géologiques et géotechniques très complexes : couches de gypse et d'anhydrite très plissées avec des pendages très variables, contact entre gypse et anhydrite non marqué, fracturation dense avec différentes orientations, altération des terrains et perte de leur résistance... Ces conditions difficiles constituent un véritable défi pour la mise en œuvre d'une exploitation souterraine.

2. OBJECTIFS ET ORGANISATION

Le MIG a pour objectif de réaliser une étude prospective sur la faisabilité de l'exploitation en souterrain du prolongement du gisement exploité dans la carrière de gypse de Saint-Jean-de-Maurienne. Le travail commence par analyser les conditions actuelles de l'exploitation à ciel ouvert et par caractériser le secteur concerné par le projet d'extension. Les principaux aspects techniques à traiter dans l'étude portent sur la géologie du gisement qui est à la fois complexe et peu connue, l'estimation des réserves exploitables, la définition des infrastructures d'accès, le choix de la méthode d'exploitation, le dimensionnement géotechnique des ouvrages et de leurs soutènements afin de garantir la stabilité à long terme de l'exploitation, la technique d'abattage à l'explosif ou mécanique et enfin l'aérage des travaux miniers souterrains. Outre ces aspects techniques, l'étude doit aussi intégrer le volet environnemental et socioéconomique du projet. Il s'agit de prendre connaissance de la réglementation liée à ce type d'extension et de mener les analyses nécessaires sur l'impact de l'exploitation envisagée sur le régime hydrogéologique, l'environnement et l'écosystème. L'acceptabilité sociale sera également abordée en se basant sur les travaux réalisés par l'exploitant dans ce cadre ainsi que sur une recherche d'informations et d'actualités locales.

Le MIG sera réalisé en 3 semaines bloquées du lundi 20 novembre au vendredi 8 décembre 2023. 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 Visites

Quatre visites sont prévues dans la première semaine du MIG. La première sera effectuée à l'Inspection Générale des Carrières (IGC) à Paris qui présentera ses activités et les moyens qu'elle met en œuvre pour gérer les risques liés aux carrières souterraines dans une région aussi sensible que Paris et les départements de la Petite Couronne (<https://www.paris.fr/pages/tout-savoir-sur-les-sous-sols-2317>).

Une journée entière sera consacrée à la deuxième visite chez le partenaire du MIG la société PLACOPLATRE. Il s'agit de découvrir les exploitations du gypse de l'est parisien à ciel ouvert (Bois Gratuel) et en souterrain (Bernouille) ainsi que le plus grand complexe plâtrier du monde à Vaujours (<https://www.placo.fr/nos-carrieres>).

La visite la plus importante se déroulera dans la vallée de la Maurienne et s'étalera sur trois journées. Elle commencera par la découverte de la carrière actuelle à ciel ouvert de Saint-Jean-de-Maurienne et du projet d'extension en souterrain. Une sortie de terrain sera réalisée pour mieux se rendre compte du contexte géologique du gisement et de ses difficultés. On profitera des travaux actuels de construction du grand projet du Tunnel Euralpin Lyon Turin, situés à proximité de la carrière, pour visiter un chantier en phase de creusement dans le but de comparer les méthodes utilisées dans les domaines minier et du génie civil (<https://www.telt.eu/fr/>).

2.2 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 : La carrière à ciel ouvert de Saint-Jean-de-Maurienne et le projet d'extension en souterrain

La première phase de ce mini-projet consiste à décrire les conditions actuelles de la carrière à ciel ouvert et à caractériser le secteur du projet d'extension de l'exploitation en souterrain. Cela concerne essentiellement les contextes géologique et hydrogéologique du gisement ainsi que l'évaluation des réserves exploitables. La seconde phase est consacrée au choix de la méthode d'exploitation à mettre en œuvre et à l'analyse de ses variantes. Cette phase comprend également la définition des infrastructures d'accès, d'aéragage et de desserte du gypse.

Mini-projet 2 : Dimensionnement géotechnique de l'exploitation souterraine

En s'appuyant sur les données acquises sur le secteur du projet d'extension concernant la géologie des terrains, une étude géotechnique sera menée pour dimensionner les ouvrages de la méthode d'exploitation retenue. Les caractéristiques mécaniques des roches nécessaires pour la conduite de cette étude seront déterminées au préalable à l'aide d'une campagne d'essais en laboratoire réalisée pour les besoins du MIG. Le dimensionnement portera sur les infrastructures d'accès et d'aéragage, les chambres et les piliers, les planches de gypse à abandonner au toit et au mur et 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). Selon la géométrie du gisement, la possibilité d'une exploitation par niveaux superposés sera examinée. Des modélisations analytique et numérique seront mises en œuvre dans cette étude géotechnique.

Mini-projet 3 : Abattage minier et aéragage des travaux souterrains

Outre l'aspect géotechnique, deux autres volets techniques de l'exploitation souterraine seront traités dans ce mini-projet : l'abattage minier et l'aéragage. 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 et des restrictions imposées par l'environnement sur l'utilisation de l'explosif et sur le niveau de vibrations induites. En ce qui concerne l'aéragage, il faut dimensionner le circuit en termes

de ventilateurs et de conduites d'air par rapport aux infrastructures envisagées. Ce mini-projet comprend aussi la définition des équipements à mettre en œuvre pour garantir la production escomptée.

Mini-projet 4 : Etude hydrogéologique

Ce mini-projet commencera par une analyse approfondie du contexte hydrogéologique de la Maurienne notamment dans la zone concernée par la carrière souterraine. L'impact de l'exploitation souterraine du gypse sur le régime hydrogéologique et la qualité des aquifères ainsi que les risques encourus à la suite d'une instabilité mécanique seront aussi évalués. Comme pour le volet géotechnique, l'étude hydrogéologique s'appuiera sur des modélisations analytique et numérique.

Mini-projet 5 : Cadre législatif, environnemental et social

Le développement d'une carrière ou le renouvellement d'une autorisation d'exploitation dans une région aussi sensible que celle de la Maurienne doit intégrer, en plus des aspects techniques abordés dans les mini-projets précédents, l'évaluation de l'impact environnemental de l'exploitation et son acceptabilité sociale. Ce mini-projet commencera donc par rappeler le cadre législatif établi par l'administration. L'étude à mener sur l'impact environnemental et sur l'écosystème concerne les bruits, les vibrations le flux des engins, la faune et la flore. Cette étude doit être complétée par l'analyse des dangers et les mesures d'évitement et de réduction. L'empreinte carbone sera également évaluée en examinant la solution d'électrification des travaux souterrains. 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 et de creusement liés à des projets de type tunnel Euralpin.

Mini-projet 6 : Evaluation économique du projet souterrain

A partir des éléments acquis 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, cashflows actualisés) pour pouvoir évaluer l'intérêt d'un tel projet 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 affecter fortement la rentabilité du projet, et qui nécessiteraient des analyses plus approfondies.

2.3 Planning

Semaine 1

Lundi 20/11 Ecole IGC - Paris	- Présentation du MIG - F. Hadj-Hassen - Conférence sur la filière du gypse – N. Petit (Placoplatre) - Visite de l'Inspection Générale des Carrières
Mardi 21/11 Placoplatre – Vaujourn Ecole	- Visite de la carrière souterraine de Bernouille - Visite de la carrière à ciel ouvert du Bois Gratuel - Visite de l'usine de plâtre de Vaujourn - Recherche documentaire à l'Ecole
Mercredi 22/11 Voyage Saint-Jean-de-Maurienne	- Départ vers Saint-Jean-de-Maurienne - Visite de la carrière à ciel ouvert du gypse
Jedi 23/11 Saint-Jean-de-Maurienne	- Visite du tunnel Euralpin (TELT) - Observations en surface du site d'étude et acquisition des données nécessaires
Vendredi 24/11 Saint-Jean-de-Maurienne	- Géologie de terrain - Retour à Paris

Semaine 2

Lundi 27/11 Fontainebleau	Réalisation des mini-projets 1 à 3 menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 28/11 Fontainebleau	
Mercredi 29/11 Fontainebleau	
Jedi 30/11 Fontainebleau	
Vendredi 01/11 Fontainebleau	Synthèse des mini-projets 1 à 3 et restitution Coordination des résultats en vue des mini-projets 4 à 6.

Semaine 3

Lundi 04/12 Fontainebleau	Réalisation des mini-projets 4 à 6 menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 05/12 Fontainebleau	
Mercredi 06/12 Fontainebleau	
Jeudi 07/12 Fontainebleau	
Vendredi 08/12 Paris	Synthèse des mini-projets 4 à 6 et restitution Préparation du plan du rapport final

2.4 Contacts**Faouzi Hadj-Hassen**

Centre de Géosciences – Mines Paris PSL

e-mail : faouzi.hadj_hassen@minesparis.psl.eu

Portable : + 33 6 76 10 35 92

Isabelle Thénevin

Centre de Géosciences – Mines Paris PSL

e-mail : isabelle.thenevin@minesparis.psl.eu

Tél : + 33 1 64 69 48 96

BIOGAZ UNE ENERGIE RENOUVELABLE D'AVENIR

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

Centre de recherche concerné : Centre Thermodynamique des Procédés (CTP).

Lieux : CTP, 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau.

RESUME

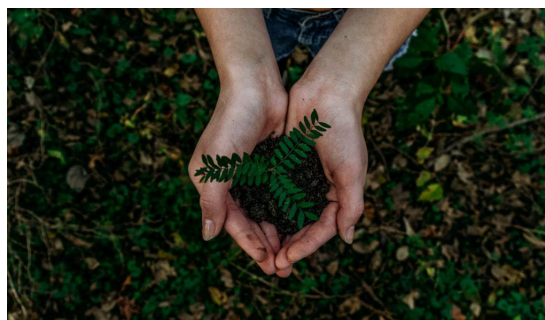
Le biogaz, mélange composé principalement de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂), est produit grâce à un processus de dégradation de matières organiques en l'absence d'oxygène. Le biométhane résulte d'un processus d'épuration du biogaz lui permettant d'avoir les mêmes propriétés que le gaz naturel et est garanti d'origine 100 % renouvelable. Le biométhane représente ainsi une voie alternative de production d'hydrogène renouvelable ou « vert ».

Les élèves seront amenés à découvrir le biogaz/biométhane de sa production jusqu'à ses différentes applications ainsi que le captage et la valorisation du CO₂.

La consommation de ce gaz renouvelable 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.

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.



Le biogaz : un gaz vert et une énergie circulaire

Biogaz/Biométhane

Le biogaz est un gaz combustible, un mélange en moyenne de méthane (CH₄) à 65% et de CO₂ 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 diversifiés – 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 CO₂, l'eau, l'azote, et des éléments indésirables en faible quantité comme l'H₂S, 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.

Composants	Ordures ménagères	Boues de STEP 1	Déchets agricoles	Déchets de l'industrie agroalimentaire
CH ₄ % vol	50-60	60-75	60-75	68
CO ₂ % vol	38-34	33-19	33-19	26
N ₂ % vol	5-0	1-0	1-0	-
O ₂ % vol	1-0	< 0,5	< 0,5	-
H ₂ 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 ₂ S mg/m ³	100 – 900	1000 - 4000	3000 – 10 000	400
NH ₃ mg/m ³	-	-	50 - 100	-
Aromatiques mg/m ³	0 – 200	-	-	-
Organochlorés ou organofluorés mg/m ³	100-800	-	-	-

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

La valorisation énergétique du 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 Nm³ 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.

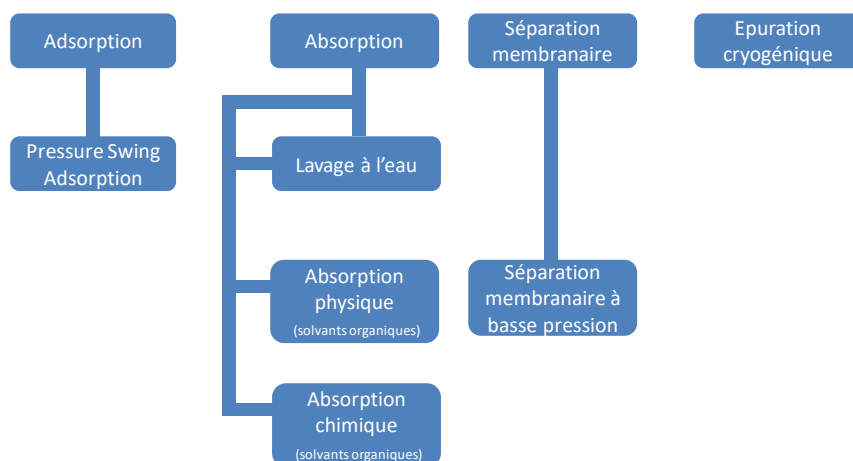
Après épuration, le biogaz atteint le même niveau de qualité que le gaz naturel et peut donc être injecté dans les réseaux de distribution et de transport : on l'appelle alors biométhane. Au 1er Mars 2023, 540 sites injectent en France (tous réseaux confondus). Environ 80% des producteurs de biométhane sont agriculteurs. Les régions Grand Est, Nouvelle-Aquitaine et Hauts-de-France représentent à elles seules la moitié de la production et des capacités installées. 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
- 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 CO₂ que contient le gaz à la sortie du méthaniseur, s'ajoutent des traces (Tableau 1) de H₂S, 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 CO₂ (décarbonation), l'H₂S (désulfuration), et l'eau (déshydratation).

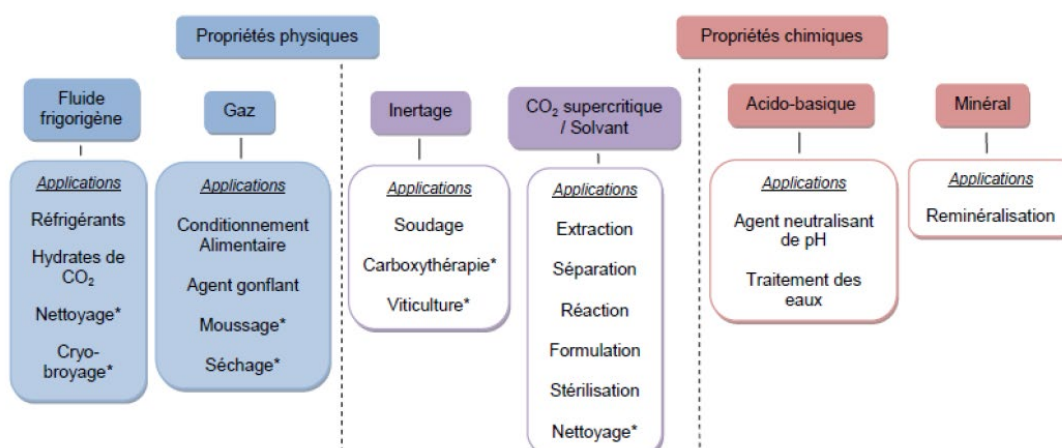
1 Boues de STEP : boues résiduelles issues de stations d'épuration traitant des eaux usées domestiques ou urbaines.



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

Valorisation et utilisation du CO₂

Principalement issu jusque-là des activités de reformage de gaz naturel, le CO₂ est historiquement 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 (Agence Internationale de l'Énergie, 2018). Mais avec le déploiement des nouvelles technologies de captage de CO₂, de nouvelles voies de valorisation du CO₂ émergent avec de nouveaux débouchés pour les industriels tels que l'utilisation du CO₂ comme matériaux de construction ou comme substitut de ressources fossiles pour la production de matières plastiques etc...



*Application de niche : représentant de quantités de CO₂ moindres à ce jour mais sont susceptibles de représenter des volumes de CO₂ valorisables plus importants à l'avenir.

Applications industrielles du CO₂ selon ses propriétés (source : L. Dumergues *et al.*, 2014)

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

Le MIG sera piloté par le Centre Thermodynamique des Procédés de Mines Paris-PSL. 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 en répondant à différentes questions.

- **Groupe 1** : Le marché du biogaz : Quelles ressources pour la production de biogaz ? Comment choisir le lieu d'implantation ? Acceptabilité et aspects territoriaux.
- **Groupe 2** : Place du biogaz dans la décarbonation des industries : alternatif au gaz naturel ?
- **Groupe 3** : Carburant alternatif pour la mobilité : GNV (gaz naturel pour véhicules) vs. BioGNV.

LES VISITES

- Visite des installations d'essais du centre de recherche, (ENGIE Lab CRIGEN, Stains, à confirmer).
- Visite des installations d'essais du centre de recherche Paris-Saclay (Air Liquide, Jouy-en-Josas).
- Visite de CVE Equimeth (une unité de méthanisation territoriale) (Moret-Loing-et-Orvanne, à confirmer).
- Visite de SUBLIME Energie (start-up qui propose une nouvelle voie de valorisation du biogaz sous forme de bioGNL), (Massy)

PROGRAMME PREVISIONNEL

Jours	Semaine 1 (du 20/11 au 24/11)	Semaine 2 (du 27/11 au 01/12)	Semaine 3 (du 04/12 au 08/12)
Lundi	9h00-17h00 / Mines Paris M : Présentation du projet et Conférence introduction d'ENGIE AM : Place de biogaz dans la transition énergétique (à confirmer)	9h00-18h00 / CTP M : réunion d'accueil site bellifontain/ Généralités sur le biogaz (M. Campestrini) AM : Travail de groupe	09h00-12h00/Massy Visite SUBLIME Energie 14h00-17h00 / Mines Paris Travail de groupe
Mardi	09h00-17h00 / Massy ENGIE (à confirmer) Production industrielle, purification et traitement de biogaz Marché actuel Projection du marché et des usages	9h00-18h00 / CTP Travail de groupe	9h00-17h00 / Mines Paris Travail de groupe
Mercredi	09h30-17h30 / Les Loges-en-Josas Air liquide Procédé de production du biogaz Biogaz dans la mobilité Chaine de valeur de biogaz et économie circulaire Captage et valorisation CO ₂	9h00-18h00 / CTP M : Visite CVE Equimeth (à confirmer) AM : Travail de groupe	9h00-17h00 / Mines Paris Travail de groupe
Jeudi	9h00-17h00 / Mines Paris M : Stockage de biogaz (GrdF, à confirmer) AM : Méthanisation et valorisation du CO ₂ (CTBM, à confirmer)	9h00-18h00 / CTP Travail de groupe	9h00-17h00 / Mines Paris Travail de groupe
Vendredi	9h00-17h00 / Mines M : Recherche de documentaire AM : enjeux et usage du biogaz (Total Energies, à confirmer)	9h00-18h00 / CTP M : Travail de groupe AM : Bilan 2ème semaine	9h00-15h30 / Mines Paris M : Présentation des résultats AM : Présentation des résultats

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Dr. Elise El Ahmar

Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines Paris-PSL

E-mail : elise.el_ahmar@minesparis.psl.eu

Portable : + 33 6 88 08 58 81

Dr. Marco Campestrini

Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines Paris-PSL

E-mail : marco.campestrini@minesparis.psl.eu

Portable : + 33 7 87 18 91 90

OPTIMISATION ET CONCEPTION AERONAUTIQUE : ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX POUR L'AERONEF DE DEMAIN.

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur** (2 max) : Pierre Arnaud et Vincent Maurel
- **Encadrants** : Pierre Arnaud, Basile, Marchand, Jean Michel Shirer, François Gallet, Nicolas Tantot
- **Centre (s) de recherche concerné (s)** : Centre des Matériaux
- **Lieux** : 63-65 rue Henri-Auguste Desbruères, 91100 Corbeil-Essonnes et 60, boulevard Saint-Michel 75272 Paris Cedex 6

RESUME

Ce MIG se concentre sur l'optimisation des moteurs d'avions utilisés dans l'aviation civile, en réponse à la croissance continue de ce secteur. L'objectif est de comprendre les défis techniques et économiques liés à cette optimisation, tout en explorant les innovations technologiques passées et récentes. Les projets englobent également la gestion des risques, y compris les préoccupations environnementales, et examine les nouvelles technologies émergentes, comme les avions électriques.

Il se déroulera sur trois semaines, comprenant des conférences, des visites d'entreprises de renom, et des mini-projets pour résoudre les défis identifiés. Ce projet offre une occasion unique de plonger dans les enjeux clés de l'industrie aéronautique, en se concentrant sur l'optimisation des moteurs et les tendances futures de l'aviation civile.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

L'industrie de l'aviation civile connaît une croissance ininterrompue depuis que l'avion a gagné en popularité dans les années 1960 en tant que mode de transport privilégié. Le nombre de passagers ne cesse d'augmenter à un rythme soutenu, avec une multitude de défis diversifiés, principalement axés sur l'amélioration de l'efficacité des moteurs.

Cette expansion se traduit par une intensification du trafic aérien, en particulier vers les pays en développement, entraînant une forte concurrence des prix. De plus, l'intensification de la concurrence avec l'arrivée de nouveaux acteurs sur le marché accentue la pression constante visant à réduire les coûts, que ce soit pour les voyageurs ou le transport de marchandises. Parallèlement, les normes environnementales de plus en plus strictes et les objectifs écologiques poussent à réduire les impacts.

Ces facteurs suscitent une expansion significative de l'industrie aéronautique, qui doit faire face à une concurrence féroce dans les domaines du développement et de l'optimisation des aéronefs et de leurs moteurs, de la réduction de la consommation de carburant, de l'amélioration de la fiabilité, de la prédiction de la durée de vie des composants et de la réduction globale des coûts. La sécurité demeure également une préoccupation majeure dans l'ensemble du secteur.

La complexité de ces défis technologiques peut être illustrée en considérant les différentes échelles impliquées, allant de plusieurs dizaines de mètres pour l'aéronef global à quelques microns comme pour la microstructure des pièces revêtues, illustré dans la Figure 1. Dans ce contexte, notre intérêt se portera particulièrement sur les moteurs et les diverses approches d'optimisation utilisées au sein de l'industrie aéronautique.

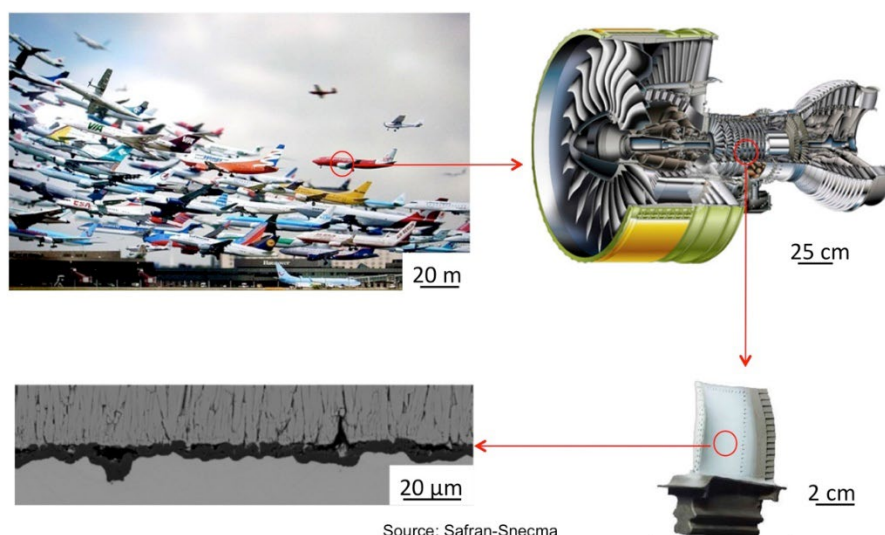


Fig. 1 : du mètre au micron

La prise de conscience croissante des risques liés au changement climatique nécessite une révision globale de la stratégie de conception aéronautique, tant sur le plan technique, avec des innovations telles que les moteurs à rotor ouvert et les moteurs à hydrogène, que sur celui des possibilités de transport dans un futur proche, incluant l'autonomie des aéronefs et la variabilité de leur taille.

OBJECTIFS ET ORGANISATION

L'objectif de ce MIG est d'explorer les aspects techniques et économiques liés à l'optimisation globale et à l'amélioration de la fiabilité des aéronefs et plus spécifiquement sur le turboréacteur utilisé dans l'aviation civile. Il faudra comprendre à la fois des technologies passées et des innovations techniques plus récentes changeant les paradigmes, ainsi que des évolutions dans l'utilisation de ces aéronefs. Nous nous pencherons en particulier sur les défis associés aux variations d'échelle, allant de l'échelle du laboratoire à celle des composants industriels. Notre étude se concentrera sur le processus de conception et de développement des composants de turbomachines développés par SAFRAN, en intégrant des approches expérimentales, ainsi que l'analyse et la modélisation de la durée de vie de ces composants.

Notre champ d'étude englobe également la gestion des risques, aussi bien du point de vue technique (assurer la fiabilité des composants) que du point de vue sociologique (comprendre l'acceptabilité des risques et l'impact environnemental). Nous examinerons les nouveaux défis qui se posent dans ce secteur, tant pour les aéronefs du futur (comme les avions électriques et hybrides) que pour les technologies de procédé émergentes.

Ce MIG se déroulera sur une période de 3 semaines consécutives, du lundi 20 novembre au vendredi 8 décembre 2023. La première semaine sera consacrée à l'acquisition des connaissances préalables, principalement par le biais de conférences, de visites d'entreprises, ainsi que par des discussions avec des experts industriels et institutionnels. Au cours des deux semaines suivantes, les participants seront chargés de mener des "mini-projets" visant à quantifier la complexité des défis et des problèmes étudiés, tout en proposant des solutions ou des axes de réflexion.

VISITES

Plusieurs visites sont prévues dans la 1^{ère} semaine du MIG. Nous commencerons par une visite à Safran Aircraft Engine (SAE) à Villaroche qui présentera les développements des moteurs Safran ainsi que le montage et banc d'essais pour la première journée. La deuxième journée sera au Bureau d'Enquêtes et d'Analyse (BEA) pour la sécurité de l'aviation avec visite du musée. La troisième journée se déroulera à Gennevilliers où nous visiterons les fonderie et PFX (fonderie expérimentale). Le site d'Ariane à Vernon sera

visité, nous verrons les bancs d'essais ainsi que les chaînes de montage et le musée expliquant l'évolution de l'aérospatiale. Nous finirons sur les visites à l'ONERA centre français de recherche de l'aérospatiale sur le site de Meudon.

MINI-PROJETS

Le travail sera organisé autour de 5 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 : Performance énergétique des avions. L'amélioration de la performance énergétique des avions, constitue un axe essentiel de notre réflexion. Nous examinerons de près la manière dont les avions sont exploités et les solutions technologiques envisageables pour optimiser leur efficacité énergétique, notamment à l'approche du futur avec des concepts tels que l'open rotor, les moteurs hydrogène et hybride.

Mini-projet 2 : Endommagement des Barrière thermiques. Pour augmenter l'efficacité des moteurs, on cherche toujours à augmenter la température de combustion des gaz qui permet d'augmenter la détente et donc la poussée. Cependant, les matériaux au contact de ces températures ne peuvent pas résister à ces dernières. C'est pourquoi aujourd'hui de plus en plus de revêtements sont utilisés pour obtenir une barrière thermique mais qui amène de nouveaux endommagements. Ici il faudra étudier au travers de modèle locale et macroscopique la tenue de ces revêtements sur une aube qui subit des forts gradients de température.

Mini-projet 3 : Enjeux et ruptures dans les transports et l'aviation. Ce projet se présente sous l'aspect d'une étude bibliographique des différentes ruptures passées et à venir possible de l'aviation. Il faudra comprendre et mettre en avant les raisons sociales et économiques qui permettent d'expliquer ces dernières. Une analyse particulière sera faite sur les impacts environnementaux actuels ainsi que des données trouvées dans les médias.

Mini-projet 4 : Fretting fatigue des aubes. Le fonctionnement de l'avion entraîne des vibrations qui se répercutent sur l'assemblage et entraînent des endommagements. On retrouve ces vibrations dans les turboréacteurs au niveau des pieds d'aube. Ce mini projet propose une étude numérique des endommagements ainsi que quelques essais pour appréhender le phénomène de fretting.

Mini-projet 5 : Microstructure et fluage. Les disques de turbines des moteurs subissent de fortes contraintes dû aux forces centrifuges et aux gradients thermiques. L'objectif est ici de comprendre l'influence de la microstructure sur les contraintes et déformations du disque ainsi que ça tenu en fonction des sollicitations d'un point de vu numérique.

PROGRAMME PREVISIONNEL

Semaine 1

Lundi 20/11 Ecole Villaroche - SAE	- Présentation du MIG à l'école – Pierre ARNAUD - déplacement à Villaroche par RER D - Visite de SAE ainsi que conférence par François Gallet et visite du musée
Mardi 21/11 Bourget - BEA	- déplacement au Bourget par RER B - Visite du Bureau d'Enquêtes et d'Analyse des accidents aéronautiques au Bourget - Conférence de Christophe Menez - Visite guidé du musée du Bourget
Mercredi 22/11 Gennevilliers – SAE/PFX Saint-Jean-de-Maurienne	- Déplacement à Gennevilliers par trans J - visite de SAE - présentation de Ngadia Taha NIANE - Visite de PFX
Judi 23/11 Vernon - Ariane	- déplacement à Vernon par TER - visite d'Ariane - présentation de Loïc Debeugny - visite du musée d'Ariane
Vendredi 24/11 Meudon – ONERA	- déplacement à Meudon par - visite du site de Meudon - présentation de Vincent Chiaruttini

Semaine 2

Lundi 27/11 Fontainebleau	- Déplacement au Centre des Matériaux Evry - présentation du laboratoire Jérôme Crépin - visite du laboratoire - présentation de la recherche autour de l'aéronautique par Vincent Maurel - Présentation des projets par les encadrants et débuts des projets
Mardi 28/11 CDM/ Ecole	Réalisation des mini-projets menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mercredi 29/11 CDM/ Ecole	
Jeudi 30/11 CDM/ Ecole	
Vendredi 01/11 CDM/ Ecole	

Semaine 3

Lundi 04/12 CDM/ Ecole	Réalisation des mini-projets menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 05/12 CDM/ Ecole	
Mercredi 06/12 CDM/ Ecole	
Jeudi 07/12 CDM/ Ecole	Synthèse des mini-projets et restitution Rédaction du rapport final
Vendredi 08/12 Ecole	

CONTACT(S)**Pierre ARNAUD**

Centre des matériaux, UMR CNRS 7633
Mines Paris, Université PSL
63-65 rue Henri-Auguste Desbrières
91100 Corbeil-Essonnes
Tel : 01 60 76 30 58
E-mail : pierre.arnaud@minesparis.psl.eu

Vincent MAUREL

Centre des matériaux, UMR CNRS 7633
Mines Paris, Université PSL
63-65 rue Henri-Auguste Desbrières
91100 Corbeil-Essonnes
E-mail : vincent.maurel@minesparis.psl.eu

ALIMENTATION DE TRAINS ELECTRIQUES OU HYDROGENE DANS UN TERMINAL PORTUAIRE

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur** (2 max) : Pedro AFFONSO NOBREGA
- **Encadrants** : Pedro AFFONSO NOBREGA et Hugo HAMBURGER
- **Centre (s) de recherche concerné (s)** : PERSEE
- **Lieux** : Sophia-Antipolis

RESUME

L'objectif de ce sujet est d'étudier et évaluer la possibilité d'installer des infrastructures de recharge pour des trains à batterie et/ou hydrogène desservant un terminal portuaire. Nous nous plongerons ainsi au cœur de deux enjeux clés pour la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique : d'une part la nécessaire électrification des transports et d'autre part le rôle capital joué par les ports, véritables hubs logistiques et, de plus en plus, énergétiques, à l'interface entre le transport maritime et terrestre. Découverte des modes de traction ferroviaires présents et futurs, étude des infrastructures de recharge électriques et hydrogène nécessaires à l'électrification des transports, planification du système énergétique afin d'assurer un approvisionnement en électricité et/ou hydrogène bas-carbone à un coût compétitif et, bien sûr, une analyse des impacts environnementaux des différentes options : les mini-projets permettront de balayer un différents aspects afin de répondre à une problématique concrète posée par le gestionnaire du Terminal de Fret de Brégaillon, dans le Var.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

La réduction des émissions de gaz à effet de serre demande l'adaptation de nombreuses infrastructures existantes. Parmi celles-ci, les terminaux portuaires, véritables hubs logistiques à l'interface entre les transports maritime et terrestre. Alimentation électrique des navires à quai, émergence de nouveaux carburants maritimes (ammoniac, méthanol, ...), électrification du fret routier et ferroviaire, report modal...A ces défis s'ajoute une sensibilité accrue des riverains face aux nuisances et impacts générés par les activités portuaires. Pour un port, réussir à s'adapter est fondamental pour la pérennité de ses activités, gages de retombées économiques pour le bassin qui l'abrite. Dans ce contexte, le Terminal Fret de Brégaillon dans le Var, dispose d'un atout important avec une voie ferrée d'accès aux quais, permettant le report modal vers le fret ferroviaire. Si aujourd'hui, les locomotives de traction utilisées sont propulsées au diesel, la perspective est leur remplacement par des locomotives à batterie ou à hydrogène. Disposer d'infrastructures de recharge pour ces nouvelles locomotives représenterait un avantage certain pour le Terminal.

Dans ce contexte, plusieurs questions se posent :

- Quelles caractéristiques techniques pour les futurs engins ferroviaires à batterie ou hydrogène, et comment ces caractéristiques se traduiront dans les cahiers de charges des infrastructures de recharge ?

- Quels besoins en termes d'infrastructure de recharge étant donnée les activités ferroviaires du Terminal et leurs perspectives d'évolution ?
- Dans quelle mesure ces infrastructures de recharge seraient-elles compatibles avec les activités du terminal portuaire, notamment en termes de sécurité, sûreté, logistique, besoins fonciers, ... ?
- Comment seraient-elles approvisionnées en énergie (électricité ou hydrogène) : possibilité d'une production renouvelable locale, besoins de renforcement du réseau électrique, flux de camions hydrogène, quel coût de l'énergie ?
- Quels seraient les impacts économiques et environnementaux associés, de l'installation à l'opération des infrastructures, en passant par la production d'électricité et/ou hydrogène ?

OBJECTIFS ET ORGANISATION

L'objectif est d'étudier et évaluer la possibilité de déploiement d'infrastructures de recharge pour des engins ferroviaires à batterie ou hydrogène dans un terminal portuaire (Terminal Fret de Brégaillon). Il s'agira de fournir des éléments de veille technologique et réglementaire, analyses technico-économiques et scénarios prospectifs permettant d'apprécier la faisabilité et éventuellement les bénéfices (économiques, environnementaux, sociaux) de telles infrastructures. Le livrable final pourra prendre la forme d'une feuille de route pour le déploiement de différentes infrastructures à court, moyen et long terme.

VISITES

Capenergies : Pôle de compétitivité menant des actions pour encourager le montage de projets privés et publics-privés autour de la transition énergétique et de l'hydrogène en particulier.

Région SUD : Echanges avec le chargé de mission hydrogène de la région.

Neptech : Startup concevant des catamarans à propulsion électrique et/ou hydrogène pour le transport de passagers ou marchandises.

HSL Technologies : Startup qui développe un vecteur de stockage d'hydrogène sous forme liquide.

Helion Hydrogen Power (à confirmer) : Filiale d'Alstom fabricant des piles à combustible pour des applications forte puissance, notamment dans le ferroviaire.

Terminal de Fret de Brégaillon : Terminal maritime sujet de l'étude.

MINI-PROJETS

Engins ferroviaires : Quelle évolution des modes de traction (électrique, hydrogène, hybride, ...) à court, moyen et long terme ? Quels prototypes/projets en cours ? Quelles caractéristiques techniques ? Il s'agira de réaliser une étude bibliographique et une étude de marché du secteur des locomotives de traction et engins ferroviaires, avec un focus sur les tendances en termes de nouveaux modes de traction alternatives à une motorisation diesel traditionnelle. L'objectif est de contribuer à l'établissement des cahiers de charges pour les infrastructures de recharge et établir des scénarios prospectifs en termes de besoins pour les prochaines années.

Stations recharge : Quelle puissance ? Quels besoins de stockage ? Raccordement au réseau ? Quelles dimensions ? Quels coûts d'installation et opération ? Il s'agira de comprendre le fonctionnement des installations de recharge électrique et hydrogène de forte puissance afin de

réaliser un prédimensionnement et une analyse technico-économique basée sur des estimations de coûts issues de la littérature.

Approvisionnement énergie : D'où viendra l'hydrogène et/ou l'électricité ? Comment ils seront produits ? A quel prix ? Possibilité de production locale ? Il s'agira de prendre en main et utiliser un modèle de système énergétique basé sur de l'optimisation linéaire et développé sur python afin d'étudier l'approvisionnement énergétique des infrastructures de recharge. Ce modèle permet d'optimiser les capacités de production, stockage et transport d'électricité et d'hydrogène afin de satisfaire une demande donnée. Aptitude/motivation pour la programmation nécessaire.

Impacts : Quelles émissions de polluants ou gaz à effet de serre ? Quelle consommation d'eau pour la production d'hydrogène ? Quels besoins d'énergie ? Quels impacts/nuisances pour les riverains du terminal ? Il s'agira de réaliser une étude d'impact et une analyse de cycle de vie des différentes options d'infrastructures de recharge et modes d'approvisionnement en énergie envisagés. Des experts de la société GreenGT participeront à l'encadrement des mini-projets "Engins ferroviaires" et "Stations de recharge". *(À confirmer)*

PROGRAMME PREVISIONNEL

20/11 au 21/11 : Découverte des enjeux et problématiques à travers des visites à la Technopôle de l'Arbois (Aix-en-Provence) et au Terminal de Brégaillon:

22/11 au 08/12 : Conférences, conduite des mini-projets et synthèse des résultats des travaux réalisés (rapport final et présentation à la CCI du Var)

Le planning détaillé est encore en construction.

CONTACT

Email : pedro.affonso_nobrega@minesparis.psl.eu

U.E. 15

Métiers de l'Ingénieur Généraliste [MIG]
Transition énergétique

MIG SOLAIRE



LA RESSOURCE SOLAIRE COMME SOURCE D'ÉNERGIE DE LA TRANSITION DE LA COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DE SOPHIA ANTIPOLIS (CASA)

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur** (2 max) : Philippe BLANC (Centre OIE, MINES Paris – PSL)
- **Encadrants** : Elena MAGLIORO (Centre OIE, MINES Paris – PSL), Coline Pacton (Paysagiste, conceptrice, doctorante de l'Université de Gènes)
- **Centre (s) de recherche concerné (s)** : Centre Observation, Impacts, Energie (O.I.E.)
- **Lieux** : Campus Pierre LAFFITTE, Sophia Antipolis

RESUME

L'objet du MIG SOLAIRE 2023 est de croiser les regards d'ingénierie et de paysagisme pour contribuer à la transition de la communauté d'agglomération de Sophia Antipolis dans le cadre de ses réflexions CASA 2040.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Composée de 24 communes s'étendant des pré-Alpes d'Azur au littoral de la Méditerranée, et de la technopole de Sophia Antipolis, la CASA comprend plus de 180000 habitants et 26700 entreprises. Soucieuse de préserver ses ressources et atouts, de contribuer à la préservation de la biodiversité ainsi qu'à la lutte contre le changement climatique et d'en anticiper les nécessaires moyens d'adaptation, la CASA a entrepris une démarche de réflexion et de concertation appelée CASA 2040 (www.casa2040.fr) avec les objectifs pour un territoire durable, attractif et inclusif.

Dans ce cadre, la CASA est en cours d'élaboration d'un plan d'actions, notamment dans les domaines de l'énergie, de l'habitat, de la mobilité, du développement économique, visant notamment à la maîtrise des consommations énergétiques, la réduction des gaz à effet de serre, le développement des énergies renouvelables ou encore l'adaptation au changement climatique. Compte tenu du climat méditerranéen du territoire parmi les plus ensoleillés de France, le MIG SOLAIRE propose de contribuer à CASA 2040 par les prismes de l'ingénierie énergétique solaire passive, thermique et photovoltaïque, de l'urbanisme et du paysage.

OBJECTIFS 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, avec le support et l'expertise d'encadrants en ingénierie et en paysagisme. Le MIG SOLAIRE travaillera notamment en partenariat avec la direction Aménagement et Energie de la CASA et la commune de Valbonne. Le point de départ des études sera le recueil des besoins auprès des parties prenantes de la CASA et des villes de Valbonne et d'Antibes, en lien avec le programme CASA 2040. Les ateliers seront organisés pour contribuer à la réflexion sur la transition énergétique de la CASA avec des propositions chiffrées d'actions et d'expérimentation suivant le prisme de la ressource solaire.

Les objectifs seront à définir avec les parties prenantes (CASA, Valbonne, Antibes, ...) mais il est possible d'en citer quelques-uns, jugés d'ores et déjà importants dans les discussions préliminaires :

- la planification et la spatialisation de la contribution de la CASA dans le déploiement futur du photovoltaïque, dans le cadre notamment de la [loi du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables](#) et de l'élaboration du Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) de la CASA, en cohérence avec le [Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires \(SRADET\) de la Région Sud](#). Des réflexions multidisciplinaires seront en particulier menées pour évaluer le potentiel solaire déjà réalisé et réalisable en priorité sur les surfaces anthropisées de la partie sud démographiquement dense de la CASA. Ces réflexions auront pour objectif de minimiser l'empreinte de ce déploiement nécessaire sur les surfaces naturelles et agricoles ;
- le potentiel solaire photovoltaïque pour de l'autoconsommation électrique collective de la commune de Valbonne Sophia Antipolis, de ses écoles, de ses bâtiments et de sa population ;
- le potentiel solaire photovoltaïque pour de l'autoconsommation électrique des entreprises de la technopole de Sophia Antipolis et de la transition vers la mobilité électrique de leurs employés et des besoins de transports logistiques ;
- le projet de centrale photovoltaïque participatif de 3 MWc du lieu-dit du Trou du Beget de la commune de Valbonne, portée par TSE. Ce projet de plusieurs hectares sur une déchetterie désaffectée non réhabilitée préfigure en effet la nécessité de déployer le photovoltaïque en priorité sur ce type de zones. Ce projet, en bordure de la technopole de Sophia Antipolis et portée par une entreprise sophilopolitaine en pleine essor sur la question agrivoltaïque, a le potentiel d'exemplarité positive dont a besoin le département (cf. [tribune](#)). Les élèves devront réfléchir à pleinement réaliser ce potentiel : solutions d'aménagement, mise en œuvre technique, engagements participatifs, etc. ;
- l'adaptation nécessaire face à l'augmentation de l'occurrence et de l'intensité des canicules estivales aggravées par le phénomène d'îlots de chaleur urbains, dans un tissu urbain dense comme celui de la ville d'Antibes avec d'importants pics de fréquentations touristiques ;
- l'opportunité de rayonnement pour la technopole de Sophia Antipolis (et son alentour) de mettre en avant, soutenir et développer les actions de R&D en énergie solaire, en s'appuyant notamment sur son tissu industriel (TSE, Solais, Solar Cloth, Axun, ValEnergies, Helioclim, etc.) et d'institutions de recherche comme le CNRS, l'INRAE, l'INRIA ou encore MINES Paris – PSL.

VISITES

Les deux premiers jours sont consacrés à la descente de Paris à Sophia Antipolis. Lors de cette descente en train, puis en bus, plusieurs visites sont prévues, en cours de validation : la CNR à Lyon, le site de la centrale nucléaire de Tricastin, le site de la centrale hydroélectrique de Génissiat, une centrale photovoltaïque. Pendant le séjour à Sophia Antipolis nous aurons aussi l'occasion de faire des visites spécifiques (Valbonne, trou du Beget, villages du moyen-pays, etc.).

PROGRAMME PREVISIONNEL

- **J1-2** : descente TGV (et bus) Paris-Sophia Antipolis avec des visites liées à des infrastructures énergétiques (départ possible le dimanche 19 novembre en fin d'après-midi)
- **J3** : formation au LEAN, conférences introductives
- **J4** : rencontres et discussions avec les parties prenantes,
- **J5-12** : visites (Sophia, moyen-pays), ateliers
- **J12-14** : finalisation des ateliers, synthèse, rédaction
- **J15** : restitution orale aux parties de prenantes

CONTACT :

Email : philippe.blanc@minesparis.psl.eu

Tél : +33 6 60 65 01 50

DETECTION PAR SATELLITE DU BLANCHISSEMENT DES RECIFS CORALLIENS

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur** : Sébastien Travadel et Franck Guarnieri
- **Encadrants** : Sébastien Travadel, Luca Istrate et Philippe Blanc
- **Centre (s) de recherche concerné (s)** : CRC, OIE
- **Lieux** : Sophia-Antipolis

RESUME

Les récifs coralliens, lieux majeurs de la biodiversité marine, sont fortement menacés par les épisodes de blanchissement à répétition. Pour autant, il n'existe pas de cartographie à grande échelle de leur état. Le recours aux satellites, couplé à des algorithmes d'apprentissage statistique pour l'identification automatique des zones critiques, paraît une piste intéressante. Cependant, l'entraînement de ces algorithmes s'appuie sur des quantités importantes de données, représentatives d'un large spectre de conditions de prise de vue. En comparaison, peu d'images satellites et de relevés *in situ* sont disponibles, compte-tenu des difficultés d'acquisition. Afin de pallier ce manque de données, les centres de recherche CRC et OIE de Mines Paris développent depuis plus de deux ans un simulateur d'images satellites, destiné à être mis à disposition de la communauté océanographique avec le concours du CNES.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Les récifs coralliens abritent environ vingt-cinq pourcents de la biodiversité marine et font vivre cinq cents millions de personnes directement. Pourtant, ils sont en passe de disparaître à travers le monde d'ici dix ans, agressés par des épisodes de blanchissement à répétition provoqués par le réchauffement de l'Océan.

Afin de mieux cerner les mécanismes de résilience développés par certains types de coraux et, lorsque cela est possible, de mettre en œuvre des mesures d'urgence de préservation, il est nécessaire de cartographier le phénomène systématiquement à grande échelle. L'utilisation d'images satellite civiles, qui couvrent de larges régions jusqu'à des résolutions de l'ordre de 50 cm, ainsi que des algorithmes d'apprentissage statistique (*Machine Learning*) pour la segmentation et l'identification des zones blanchies, pourrait fournir une solution efficace.

L'entraînement d'algorithmes d'apprentissage statistique nécessite toutefois des volumes importants de données qualifiées, pour couvrir un large spectre de conditions opérationnelles qui déterminent les propriétés de l'image (caractéristiques optiques du ciel, état de la surface de l'eau, composition de la colonne d'eau, nature du fond, etc.). Or, la disponibilité limitée des constellations satellites rend impossible une collecte de données à l'échelle requise. Afin de dépasser cette limitation et compte tenu des nombreuses autres applications possibles pour la surveillance de l'Océan, les centres de recherche CRC et OIE de Mines Paris développent depuis

plus de deux ans, avec le concours des élèves de l'école, un simulateur d'images satellites, qui a déjà montré des résultats prometteurs pour la détection de pollutions de surface.

Le MIG OCEAN vise désormais à tester la possibilité d'identifier automatiquement des zones sous-marines de récifs coralliens blanchis, à partir des images très haute-résolution Pléiades. Pour cela, les élèves devront compléter le simulateur par des modules de propagation des rayons lumineux depuis la surface de l'eau jusqu'au fond, intégrant l'absorption et les différents types de diffusion par les particules en suspension, ainsi que les propriétés de réflexion des récifs coralliens.

OBJECTIFS ET ORGANISATION

L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure une cartographie du blanchissement du corail pourrait être mise à disposition des océanographes à partir des images de la constellation Pléiades. Dans cette perspective, les élèves devront s'organiser pour, collectivement :

- réaliser (en Python) les modules de simulation de propagation sous-marine de la lumière et les intégrer au simulateur de propagation de surface ;
- générer un jeu massif d'images synthétiques contenant divers fonds (notamment des coraux blanchis ou non) et selon des conditions opérationnelles variées, puis entraîner des algorithmes d'apprentissage statistique sur ces données ;
- tester leur performance sur des images d'archives de zones pour lesquelles le CRILOBE a effectué des relevés *in situ* (Polynésie).

Le rendu du MIG OCEAN ne sera pas un rapport, mais le code informatique lui-même, qui devra être organisé et commenté de manière rigoureuse. Un accompagnement méthodologique sera mis en place à cette fin. Une note de synthèse (trois pages) sera également remise au jury.

VISITES

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

- le Centre Scientifique de Monaco, où seront présentées ces étranges créatures, à la fois animales, végétales et minérales, ainsi que les stress environnementaux auxquels elles font face et les enjeux de leur préservation ;
- 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 :

- la société ACRI présentera les principes de propagation des rayons lumineux en milieu sous-marin et ses applications à l'océanographie ;
- la Fondation Tara Océan présentera ses travaux de recensement de l'état des coraux ;
- le CNES présentera l'utilisation des constellations satellites pour l'observation de l'Océan.

MINI-PROJETS

Les élèves se répartiront en mini-groupes pour développer les modules de simulation de la propagation des rayons lumineux depuis la surface de la mer jusqu'aux fonds marins, puis entraîner et tester différents algorithmes d'apprentissage statistique. Cela inclut : la création d'une scène de simulation (soit une colonne d'eau inhomogène et un relief sous-marin) ; la modélisation de l'absorption et des différents modes de diffusion par les particules en suspension ; la modélisation de la réflexion par des fonds marins de nature variée (notamment des coraux blanchis ou non) ; le test de plusieurs familles d'algorithmes d'apprentissage ; l'analyse

d'images réelles pour calibrer et tester les modèles à partir de relevés effectués sur zone par des plongeurs ; l'intégration du code dans le simulateur existant. Par ailleurs, tous les élèves devront contribuer à une revue de littérature sur les moyens d'évaluation du blanchissement des coraux.

Une présentation des résultats sera en outre organisée le vendredi 8 décembre au matin devant des experts du CRILOBE, du CNES, de Tara Océan, de la société ACRI et de l'Institut Océanographique de Monaco.

PROGRAMME PREVISIONNEL

Date	Matin		Après-midi
Dimanche 19			Arrivée à Sophia Antipolis
Lundi 20	Conférence sur les coraux par le CRILOBE		Présentation par ACRI des modèles de propagation sous-marine
Mardi 21	Introduction à la génération d'images par <i>ray tracing</i>		Visite du Centre Scientifique de Monaco
Mercredi 22	Visite de Thalès Alenia Space (Cannes)		Présentation par le CNES des moyens de surveillance de l'Océan par satellite Présentation par Tara Océan des activités de recensement du blanchissement du corail
Jeudi 23	Crash-course et travaux pratiques sur les structures de données en Python		
Vendredi 24	Méthode bibliographique	Organisation	Prise en main des images satellite et des modules de simulation existants
Lundi 27	Projet		
Mardi 28			
Mercredi 29			
Jeudi 30			
Vendredi 1^{er}			
Lundi 4	Projet		
Mardi 5			
Mercredi 6			
Jeudi 7	Structuration du rapport et consolidation du code / préparation de la présentation		
Vendredi 8	Présentation des travaux à des experts		Présentation des séquences Migs sur Sophia

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES ET CONTACTS

Les élèves seront hébergés sur Sophia Antipolis en résidence étudiante à proximité du site de l'Ecole. Le transport vers Sophia s'effectuera en train le dimanche 19 novembre, préférentiellement depuis Paris.

Pour toute information complémentaire, contacter Sébastien Travadel :

E-mail : sebastien.travadel@mines-paristech.fr / **Tél** : 06 47 93 17 25

MATERIAUX POUR LA MODE ET POUR LE LUXE

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur:** Francesco Delloro
- **Encadrants :** J.D. Bartout, A. Debray, J. Schmitt
- **Centre de recherche concerné :** Centre des Matériaux
- **Lieux :** Paris, Evry

RESUME

Ce MIG, fortement transdisciplinaire, veut donner un aperçu de l'univers de la mode et du luxe, à travers d'une approche par la « matière ». Ce secteur est très vaste et englobe un grand nombre de métiers, plus ou moins artisanaux, toujours caractérisés par une attention particulière vers l'excellence de la matière et du rendu.

Les élèves seront amenés à découvrir cet univers par des séminaires et des visites d'exception, ainsi que par des activités plus pratiques, comme l'atelier « retroengineering du vêtement » et les mini-projets. De plus, des moments d'échanges avec les étudiant.es du master PSL ENAMOMA (<https://psl.eu/formation/enamoma>) et ceux/celles du master à Dauphine « Management du Luxe » (<https://dauphine.psl.eu/formations/masters/marketing-et-strategie/m2-management-du-luxe>).

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

La filière Mode & Luxe est d'une importance capitale pour l'économie française. La France est en effet le premier acteur mondial du secteur. La filière est composée de grands groupes (LVMH, Kering, Hermès...), de marques de créateurs comme de prêt à porter, d'artisans et d'entreprises de fabrication, dont une grande majorité sont des PME, voire des TPE. Chacune de ces entreprises détient des savoir-faire artisanaux ou semi-industriels qui s'inscrivent pour beaucoup dans une histoire et un territoire, résultant d'un long apprentissage. Quelle est la place de l'innovation et, plus précisément, des nouveaux procédés et matériaux dans ce secteur, si particulier ?

Le secteur Mode & Luxe est caractérisé par des spécificités qui lui sont propres et qu'il faut apprendre à décrypter. Pour ce faire, un regard fortement transdisciplinaire est nécessaire. La filière est confrontée à de nouvelles problématiques : transformation des comportements des consommateurs, importance de l'expérience client, émergence de façons inédites de produire et de vendre. Tout cela nécessite l'adaptation des compétences et des métiers, le déploiement de nouvelles technologies, une attention particulière à porter aux ressources et à l'environnement, ainsi qu'à l'humain et au sens. Pour réussir ces défis, le secteur est en quête permanente d'innovation, pour alimenter les créateurs, satisfaire les nouveaux clients, s'adapter à un monde qui change.

OBJECTIFS ET ORGANISATION

- Fournir aux élèves des clés de lecture de l'univers de la mode et du luxe, par une approche « matière ».
- Présenter les défis d'aujourd'hui dans ces secteurs.
- Toucher aux enjeux autour de l'innovation dans un des sous-secteurs Mode & Luxe dans le cadre des mini-projets.

VISITES

- Hermès : ateliers J3L galvanisation à Champigny sur Marne et ateliers du cuir à Pantin
- Le nouveau Domolab St Gobain : approche sensorielle aux matériaux
- La réserve des arts : une mine de matières pour les créateurs
- Archives Balenciaga : haute couture

MINI-PROJETS

Hermès : les patines du bronze, comment industrialiser des procédés artisanaux

Etude des procédés de patines noires sur bronze donnant lieu à une patine plus adhérente et plus résistante. Recherche des procédés de finition apportant un noir profond et une meilleure résistance mécanique et à la corrosion. Lieux : Centre des Matériaux à Evry, avec l'implication de la plateforme micromax.

Nouvelles technologies pour le luxe, fabrication additive de bijoux par fusion laser sur lit de poudre.

Design et fabrication d'un bijou en inox par fusion laser sur lit de poudre, avec un regard sur l'analyse des coûts. Questionnement sur l'Etat de surface « brut de fabrication » : défaut ou opportunité ? Lieux : Centre des Matériaux à Evry, avec l'implication de la plateforme EPROM.

Mossi Traoré : valorisation des déchets, le cas du textile dérivé de la caséine

Il est possible de produire un fil et, donc, du tissu, à partir de la caséine issue du lait impropre à la consommation. Cette nouvelle matière intéresse le créateur de mode engagé Mossi Traoré. Quelles propriétés, quelles possibilités pour cette nouvelle matière ? Lieux : atelier ENAMOMA (Paris, rue St-Jacques)

La réserve des Arts : une approche sensorielle aux matériaux

La réserve des arts est une mine de matières intéressantes pour la création. Ce projet, encadré par la Dr. Joséphine Schmitt, porte sur la découverte de l'approche sensorielle des matières, avec ses concepts, son vocabulaire et son potentiel de création. Lieux : Mines

PROGRAMME PREVISIONNEL

Semaine 1

Date	Matin	Aprèm
Lun 20	@Mines : présentation du MIG, cours introductif sur les spécificités des secteurs Mode et Luxe, cours sur l'innovation matière face aux enjeux de responsabilité dans la mode et le luxe	@ENAMOMA : atelier pratique « Retro engineering du vêtement »
Mar 21	@Mines: cours sur l'approche sensorielle des matériaux pour la mode et le luxe, présentation Carnot Mines Carats, présentation groupe Richemont	Visite de la Reserve des Arts
Mer 22	Visite Hermès Champigny (atelier galvanisation)	Hermès Pantin (atelier cuir)
Jeu 23	@Mines: cours marketing du luxe	Rencontre avec Mossi Traoré (créateur de mode), Visite Archives Balenciaga
Ven 24	Visite Domolab St Gobain	@Dauphine: séminaire de Jean-Philippe Vergne « les NFT dans la mode »

Semaines 2 et 3

Date	Matin	Aprèm
Mar 28	Projets	
Mer 29	Projets	
Jeu 30	Travail groupé Master Luxe Dauphine	Projets
Ven 1	Projets	
Lun 4	Projets	
Mar 5	Projets	
Mer 6	Projets / consolidation	
Jeu 7	Travail groupé Master Luxe Dauphine	Consolidation
Ven 8	Consolidation	Consolidation

CONTACT : francesco.delloro@minesparis.psl.eu

APPROVISIONNEMENT EN LITHIUM : QUELS GISEMENTS A CONSIDERER POUR REpondre AUX OBJECTIFS DE LA TRANSITION ENERGETIQUE DE LA FRANCE ET DE L'EUROPE

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateur** (2 max) : Nicolas Seigneur, Damien Goetz
- **Encadrants** : Dominique Bruel, Louis Raimbault
- **Centre (s) de recherche concerné (s)** : Géosciences
- **Lieux** : Fontainebleau, Paris, Grand Est

RESUME

Au cours de ce MIG, les élèves vont réaliser une étude multi-critère de trois différents gisements de Lithium : Echassières (Allier), la récupération de Lithium dans les saumures géothermales (Alsace) et la récupération au sein de salars. Le but est de proposer, sur base d'une analyse technique, un plan minier pour chacun de ces trois gisements. Sur base de cette analyse, une comparaison économique et environnementale sera réalisée afin d'exclure certains types de gisements. Finalement, une analyse à l'échelle française et européenne de la disponibilité de ces gisements sera confrontée aux objectifs affichés de l'Europe en matière d'approvisionnement en Lithium pour sa transition énergétique.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Dans le cadre de sa transition énergétique, l'union européenne projette un approvisionnement en Lithium multiplié par 20 en moins de 10 ans pour l'électrification des véhicules. Face à de telles projections, il convient de se poser la question de comment de tels objectifs peuvent être atteints, tout en restant respectueux de l'environnement.

OBJECTIFS ET ORGANISATION

Les objectifs de ce MIG sont variés : il s'agit de mener une analyse technique permettant de proposer un plan minier dédié à un type de gisements. Deuxièmement, l'analyse économique sur le cycle de vie de la mine sera établie. Ensuite, ce MIG a pour but d'éclairer les différents impacts environnementaux associés à des projets miniers. Finalement, la comparaison et l'extrapolation à l'échelle européenne permettra de confronter l'analyse aux projections européennes.

VISITES (à confirmer)

- Imérys – Eramet (Paris)
- Soultz-sous-Forêts : géothermie
- Kaolins de Beauvoir : Echassières
- Projet de stockage souterrain – enjeux géotechniques

MINI-PROJETS

MP 1-2-3 : étude des différents gisements

Pour les trois gisements identifiés (Echassières, saumures géothermales d'Alsace et salars), un plan d'exploitation sera réalisé qui permettra de réaliser une analyse économique comparative.

MP 4 : Comparaison de la rentabilité économique des différents gisements

Sur base des plans d'exploitation identifiés au préalable, l'étude économique sur toute la vie de la mine sera réalisée pour les trois gisements. Cette analyse économique devra être paramétrisable pour être extrapolable à d'autres gisements potentiels comparables en Europe.

MP 5 : Comparaison des impacts environnementaux de l'exploitation des différents gisements

L'analyse des impacts environnementaux et des émissions de CO₂ associées aux différents types d'exploitation sera réalisée. Le but de cette démarche est de disqualifier certains gisements si ceux-ci présentent un risque environnemental trop important.

MP 6 : Identification de gisements de Lithium à l'échelle de la France et de l'Europe

Sur base de l'analyse économique-environnementale qui retiendra certains types de gisements, une analyse à l'échelle européenne de la disponibilité de ce type de gisement sera faite. L'objectif final de cette étude est de confronter la ressource disponible économiquement et qui répond à des critères environnementaux aux projections européennes en matière de transition énergétique.

PROGRAMME PREVISIONNEL

1^{ère} semaine : Visite (Imérys & Eramet, Grand Est)

2^{ème} semaine : mini projets d'établissement des plans miniers sur les 3 gisements (Fontainebleau)

3^{ème} semaine : rédaction du rapport et comparaison (économique, environnementale) des gisements et analyse à l'échelle européenne (Paris)

CONTACT(S)

- **Nicolas Seigneur** : nicolas.seigneur@mines-paristech.fr
- **Damien Goetz** : damien.goetz@mines-paristech.fr
- **Dominique Bruel** : dominique.bruel@mines-paristech.fr
- **Louis Raimbault** : louis.raimbault@mines-paristech.fr

VERRE ET MECANIQUE

ENCADREMENT PROJET

Coordinateurs : Franck Pigeonneau (CEMEF)

Encadrants : Pierre-Olivier Bouchard, Guillaume Corvec, Christophe Pradille, Morgane Rondet (CE- MEF), Wilfried Blanc, Matthieu Bellec (Int. Phys. de Nice)

Centre de recherche concerné : CEMEF

Lieux : Paris & CEMEF

RESUME

Au cours de ce MIG le métier d'ingénieur R&D en science et technique du verre sera entrevu. La première semaine sera consacrée aux bases fondamentales de l'état vitreux, aux principes de l'élaboration et à sa production à l'échelle industrielle. Des producteurs et utilisateurs de verre présenteront les enjeux techniques et économiques de la filière verre en France. Deux visites, l'une d'un centre de R&D industriel et l'autre d'une usine de production sont au programme. Les deux autres semaines seront consacrées aux mini-projets réalisés au sein du Centre de Mise en Forme des Matériaux de Sophia-Antipolis. Pour cette édition, la mécanique des verres sera développée plus en détail. La résistance mécanique de fibres de renforcement seront étudiées à l'aide de la mise au point d'expériences. La nécessité d'avoir des données matériaux sera traitée par l'utilisation de technique d'apprentissage automatique conjointement avec des bases de données.

Mots-clés : Verre, mécanique, fibre, apprentissage automatique, analyse vibratoire, thermique.

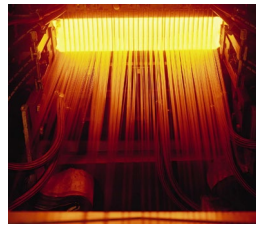
CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Il devient 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 la lumière voire transporter de l'information à l'aide des fibres optiques. Utilisées dans les matériaux d'isolation thermique ou phonique des maisons, les fibres de verre sont employées comme renfort dans les matériaux composites. Ces fibres se différencient par leur composition et les procédés de mise en forme. La FIGURE 1 montre les photographies de trois procédés de fibrage. Au cours de ce projet, une dimension particulière à la mécanique des verres sera développée. La rupture de ce matériau sera étudiée expérimentalement. Les propriétés des verres seront également abordées à la fois en utilisant des méthodes d'apprentissage automatique. Des méthodes simples pour mesurer certaines propriétés seront également à mettre en place.

(a) Procédé TEL (laine de verre



(b) Filière de fibres de renforcement



(c) Fibre optique

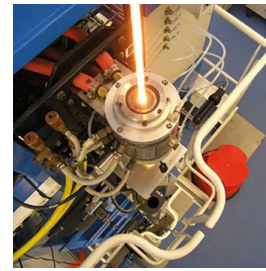


Figure 1 – Procédés de fibrage du verre (a) laine de verre, (b) fibres de renforcement et (c) fibres optique.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

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 présentes. 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 permettant de renforcer les acquis de la première semaine.

Quatre mini-projets seront proposés au cours desquels des expériences et des simulations numériques seront mises en place. Le rapport à fournir pour le 22 décembre devra être rédigé dès le début du MIG. Pour le bon fonctionnement du MIG, un responsable du groupe sera nommé au lancement du cours.

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. Un exposé sera également consacré aux fibres de renforcement avec une intervention d'Anne Berthereau, directrice R&D d'Owens Corning. Wilfried Blanc, directeur de recherche CNRS à l'Institut Physique de Nice, présentera les récents développements sur les fibres optiques. Xavier Capilla de l'Institut du Verre, responsable environnement pour l'industrie du Verre, présentera les enjeux environnementaux de la filière verre en France.

Un cours sur la mécanique du verre sera donné par un des plus grand spécialiste en la matière, René Gy, directeur de département à Saint-Gobain Recherche. Corinne Payen, directrice R&D de Verallia, parlera de la filière de verre d'emballage (pots et bouteilles). Deux chercheurs du CEMEF compléteront l'offre pédagogique sur des aspects plus numériques. Les deux visites prévues au programme sont détaillées plus bas. Néanmoins, il est à remarquer que la première aura lieu dès le premier jour de la période bloquée. Les deux dernières semaines de la période bloquée se dérouleront au CEMEF après un voyage en train. L'emploi du temps de la première semaine est détaillé ci-dessous :

Lundi 20 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
8h00–18h00	Visite du centre de recherche de Saint-Gobain Isover, Rantigny	
Mardi 21 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
9h00–10h00	Présentation & organisation du MIG	Franck Pigeonneau
10h00–12h00	Introduction sur les verres d'oxydes	
13h30–15h00	La R&D des fibres de renforcements	Anne Berthereau (Owens Corning)
15h30–17h00	Principe de l'élaboration des verres	Franck Pigeonneau
Mercredi 22 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
8h30–10h00	Les fibres optiques	Wilfried Blanc (Inst. Phys. de Nice)
10h30–12h00	L'industrie verrière face aux enjeux environnementaux	Xavier Capilla (Institut du verre)
13h30–15h00	Mécanique des verres	René Gy (Saint-Gobain Recherche, Paris)
15h30–17h00	Procédés de fusion	Franck Pigeonneau
Jeudi 23 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
09h00–10h30	Introduction à l'analyse numérique	Aurélien Larcher (CEMEF)
11h00–12h30	Vibration des structures	Franck Pigeonneau
13h30–17h00	Visite de l'usine SGD Pharma, Sucy-en-Brie	
Vendredi 24 novembre		
Horaires	Intitulé	Intervenant
9h00–10h30	Introduction à l'apprentissage automatique	Jonathan Viquerat (CEMEF)
11h00–12h30	Les emballages en verre	Corinne Payen (Verallia)
13h30–15h00	Formation documentaire	Sylvain Metafiot
15h30–17h00	Description des mini-projets et constitution des groupes	

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 pointure pour pouvoir prendre des équipements de sécurité. Des comptes rendus de visite seront à réaliser et à mettre dans le rapport final du MIG.

Centre de Recherche de Saint-Gobain ISOVER de Rantigny, CRIR

Saint-Gobain ISOVER est une société du groupe multinational de Saint-Gobain. Cette société produit et commercialise des matériaux pour l'isolation thermique et phonique des habitats. La R&D d'ISOVER est développée au sein des différents centres de recherche de Saint-Gobain. Le Centre de Recherche de l'Isolation de Rantigny est entièrement dédié à Saint-Gobain ISOVER. Il dispose d'installations pilote qui seront en fonctionnement lors de notre visite. Nous aurons également la visite d'installation permettant la mesure des résistances thermiques de matériaux isolants.

Figure 2 – CRIR situé à proximité de Compiègne (60, Oise).



Nous serons accueillis par Jean-Marc Flesselles qui nous fera également un exposé sur la R&D de Saint- Gobain ISOVER. Le détail de la journée sera fourni prochainement. Pour se rendre sur place, nous utiliserons le train de banlieue depuis la gare du nord pour aller jusqu'à la gare de Liancourt-Rantigny. Le reste se fait à pied (1,8 km) selon le chemin détaillé ci-dessous :

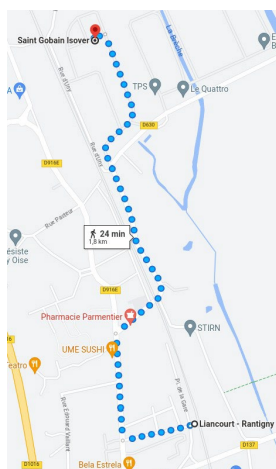


Figure 3 – Chemin pour aller de la gare de Liancourt-Rantigny au centre de recherche de l'isolation, adresse 19 rue Emile Zola, 60290 Rantigny.

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 4. 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, facilement accessible en RER.

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



Figure 4 – Emballages produits par SGD Pharma destinés au marché pharmaceutique.

MINI-PROJETS

L'objectif global du MIG est d'initier les élèves aux différents aspects de R&D dans le domaine particulier du verre. Le groupe sera décomposé en quatre sous-groupes en charge de projets. Des études de natures expérimentale et de modélisation seront abordées. Des points d'avancement seront réalisés avec des industriels. Les quatre mini-projets sont détaillés ci-dessous.

M.-P. 1 : Propriétés des verres en fonction de la composition chimique**Encadrants : Morgane Rondet**

Les propriétés thermique, mécanique ou encore électrique dépendent principalement de la composition en oxydes du verre. Pour avoir des données sur l'ensemble des propriétés à partir d'une composition donnée, on dispose de base de données matériau. La recherche de propriétés pour une composition n'appartenant pas aux bases nécessite de faire des interpolations dans la base. Dans ce mini-projet, on mettra à profit la base de données Intergrad V8 pour mettre au point des modèles d'apprentissage automatique basés sur la construction de réseaux de neurones artificiels.

Les points développés au cours de ce mini-projet sont les suivants :

1. Développement de réseaux de neurones < naïf > utilisant la base de données ;
2. Développement de réseaux de neurones basés sur des modèles théoriques et physiques ;
3. Prédications de propriétés mécaniques et comparaisons avec les données expérimentales du M.-P. 3.

M.-P. 2 : Fracture des fibres de verre et statistique de Weibull**Encadrants : Guillaume Corvec, Pierre-Olivier Bouchard**

Les verres sont connus pour leur fragilité. Intrinsèquement, leur limite à la rupture est assez élevée. En pratique, les valeurs trouvées sont bien plus basses et également très variables. La cause est principalement liée au fait que la casse est provoquée par des défauts en surface. Il est alors plus pertinent de déterminer les probabilités de rupture. Dans ce mini-projet, on étudiera la probabilité de casse de fibres de verre, type Advantex, fournis par la société Owens Corning. De même, des expériences sur des fibres optiques dopées ou non en oxydes de terres rares seront testées.

Le mini-projet sera articulé autour des points suivants :

1. Mise au point du dispositif expérimental ;
2. Rupture de fibres uniques Advantex et détermination de la loi de probabilité de casse ;
3. Rupture de fibres Advantex longues et courtes et détermination de la loi de probabilité de casse
4. Rupture de fibres optiques longues et courtes et détermination de la loi de probabilité de casse.

Des correspondants d'Owens Corning suivront les avancées de ce travail. De même, Wilfried Blanc sera consulté pour les fibres optiques.

M.-P. 3 : Détermination du module de Young et de la dureté Vickers de verres**Encadrants : Franck Pigeonneau, Christophe Pradille**

Le module de Young est l'une des propriétés mécaniques essentielles à connaître. A cause de la fragilité du verre, les techniques usuelles comme la flexion trois points ou la traction sont peu fiables. On utilisera dans ce mini-projet la mise au point d'un banc de mesure basé sur la vibration sonore de poutres. L'analyse en mode propre dépend de la vitesse du son dans un corps homogène et isotrope qui est directement liée au module de Young, E . En parallèle de cette détermination, des mesures de dureté Vickers seront réalisées. On cherchera à trouver une relation entre les deux données. Les échantillons de verre nous seront fournis par un producteur de verre de flaconnage italien, Bormioli Luigi. On cherchera à voir l'effet de la composition sur le module de Young et la dureté Vickers.

1. Mise au point d'un banc de mesure de E
2. Détermination de E et analyse des erreurs ;
3. Mesure de HV sur un micro-indenteur Vickers ;
4. Comparaison avec les prédictions du M.-P. 1.

Ce groupe correspondra avec Emanuela Fava de Bormioli Luigi.

M.-P. 4 : Chauffage par laser femto-seconde**Encadrants : Christophe Pradille, Franck Pigeonneau, Matthieu Bellec**

Les fibres optiques sont utilisées pour faire des détecteurs. Pour cela, les cœurs des fibres sont dopés à l'aide d'oxydes de terres rares, Er ou La. Lors de la mise en forme de ces fibres, une séparation de

phase apparaît produisant la formation de nano-particules. Lors de l'étirage, ces nano-particules s'allongent. Certaines se cassent mais d'autres restent étirées sans rompre. Pour arriver à les casser, on souhaite les chauffer à l'aide d'un laser femto-seconde. Pour vérifier le niveau de température espéré, une expérience modèle est à développer avant les tests sur les fibres. L'objectif ici est de vérifier si l'échauffement attendu est conforme au modèle théorique.

Le projet sera construit autour des étapes suivantes :

1. Modélisation théorique de la chauffe par laser ;
2. Détermination de la température maximale d'échauffement en fonction des paramètres laser (énergie et fréquence de répétition des impulsions) ;
3. Réalisation d'échantillons en verre avec introduction de thermocouples ;
4. Etude de l'échauffement avec un laser femto-seconde.

Les expériences avec le laser seront réalisées à l'Institut Physique de Nice sous la responsabilité de Matthieu Bellec. Ce groupe communiquera avec Wilfried Blanc.

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.

Les deux semaines suivantes auront lieu au CEMEF à Sophia-Antipolis. Les élèves s'séjourneront dans la résidence Néméa située à Sophia Antipolis. Des chambres ont été déjà réservées pour tous les élèves venant réaliser leur MIG à Sophia Antipolis. Le voyage de Paris se fera en train depuis Paris jusqu'à Antibes. Ensuite, on organisera des navettes pour conduire les élèves de la gare d'Antibes au Néméa.

Pour tous renseignements, contacter **Franck Pigeonneau** :

- **Email** : franck.pigeonneau@minesparis.psl.eu
- **Tel.** : 06 31 26 04 72.