

L'hydrogène dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Coordinateurs : Pedro AFFONSO NOBREGA et Robin GIRARD

Encadrants : Pedro AFFONSO NOBREGA, Robin GIRARD et Anaëlle JODRY

Centres de recherche concernés : PERSEE

Lieux : Sophia-Antipolis

RESUME :

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

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

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

Aujourd'hui, l'hydrogène est utilisé essentiellement comme un composant chimique dans l'industrie (raffinage, production d'ammoniac, etc.). Cet hydrogène est produit à partir de sources fossiles (gaz naturel ou charbon, notamment), la voie la plus mature et économique, mais avec des fortes émissions de CO₂ associées. Il est donc nécessaire de remplacer cet hydrogène fossile par un hydrogène issu de sources d'énergie renouvelables ou bas carbone (via l'électrolyse de l'eau notamment), ou bien mettre en place une capture et un stockage du CO₂, pour autant que la pertinence technique, économique et écologique de cette voie soit démontrée².

Par ailleurs, l'hydrogène est vu comme un vecteur énergétique important pour le futur. D'une part, il peut permettre la décarbonation de secteurs dont les émissions de CO₂ seraient difficiles à diminuer autrement (sidérurgie, mobilité terrestre lourde, sites isolés, aviation, transport maritime...). D'autre part, il peut favoriser le

déploiement de sources d'électricité renouvelables via le stockage saisonnier, la flexibilité (dans le temps et dans l'espace) et le couplage avec les réseaux de gaz.

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

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

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

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

L'objectif de ce MIG sera d'étudier l'évolution de la demande d'hydrogène dans différents territoires de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur dans un contexte de décarbonation de l'industrie et de transition énergétique. Pour chaque territoire il s'agira de :

- Etablir les usages actuels et potentiels de l'hydrogène, tant comme composant chimique que comme vecteur énergétique ;
- Proposer des scénarios d'adoption de l'hydrogène et donc d'évolution de la demande à partir de taux de pénétration des différentes technologies.
- Analyser les possibilités d'approvisionnement en hydrogène en réponse à la demande du territoire en recherchant le réseau optimal de production/distribution le plus approprié au territoire (production centralisée au niveau régional puis transport vers les différents territoires, production décentralisée au lieu de distribution, un mix des deux).

- Estimer le (sur)coût associé à chaque scénario, ainsi que son impact en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre mais aussi d'enjeux sociétaux.
- Comparer ces scénarios avec des scénarios mettant en jeu d'autres alternatives que l'hydrogène (e.g. batteries, biogaz, etc.)
- Envisager les questions d'acceptabilité au niveau humain en lien avec la gestion du risque hydrogène

Cette démarche donnera lieu à un outil permettant de faire des analyses de sensibilité par rapport à différents paramètres (taux de pénétration, coûts des technologies, origine de l'hydrogène, stratégie de déploiement des infrastructures...).

Concrètement, le travail commencera par une recherche sur les usages actuels et potentiels de l'hydrogène, en prenant pour point de départ des projets en cours (à ce jour des projets de démonstration en grande partie) et le Plan Hydrogène Régional. Les élèves devront ensuite caractériser leurs territoires (par exemple, en ce qui concerne les bus à hydrogène, il s'agirait du nombre de bus dans le territoire, les km parcourus par an, etc.) et proposer des scénarios en lien avec le Plan Hydrogène Régional. Ce faisant, ils dégageront des types représentatifs des territoires régionaux (territoires industriels, territoires ruraux, en plaine, en montagne, territoires littoraux...). En parallèle, il s'agira d'obtenir des indicateurs technico-économiques pour les différentes technologies/équipements/procédés concernés, auprès des fournisseurs, dans la littérature scientifique ou dans des rapports spécialisés. Un outil de calcul sera développé (a priori feuille de calcul Excel) permettant de faire des analyses de sensibilité.

MINI-PROJETS

Les élèves seront répartis en groupes de 3-4 et chaque groupe étudiera un territoire type de la région :

- Unité urbaine de Nice : une unité urbaine de presque 1 million d'habitants, densément peuplé sur l'axe Cannes-Antibes-Nice ;
- Bassin industriel de Fos-sur-Mer : zone portuaire avec une forte concentration d'industries lourdes dont certaines sont ou pourront être consommatrices d'hydrogène (raffineries, aciérie, ...) à proximité de la Métropole Aix-Marseille ;
- Département des Hautes-Alpes : département faiblement peuplé, en zone de montagne et à forte vocation touristique.
- Durance Luberon Verdon Agglomération (DLVA) : agglomération disposant d'un site de stockage en cavités salines et fort potentiel photovoltaïque (foncier disponible, ensoleillement, ...).

LES VISITES

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

Siège de la Région SUD (Marseille) : Présentation du Plan Régional H2.

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

Arcelor/Jupiter 1000 (Fos-sur-Mer) : Visite de l'aciérie et démonstrateur de production et d'injection d'hydrogène ou de méthane de synthèse à partir de CO2 industriel dans le réseau de gaz.

Incinérateur EVERE (Fos-sur-Mer) : Valorisation énergétique des déchets de la Métropole Aix-Marseille, visite de l'incinérateur.

Géométhane (Manosque) : Visite du site de stockage de gaz en cavités salines.

D'autres visites sont en cours de discussion...

PROGRAMME PREVISIONNEL

15/11 – Arrivée en TGV à Marseille à 9h30, présentation du plan régional H2 par la Région le matin. Visite à Capenergies l'après-midi.

16/11 – Visite Arcelor/Jupiter 1000 (matin) et Incinérateur EVERE (après-midi) à Fos-sur-Mer.

17/11 – Visite Géométhane à Manosque le matin. Retour à Sophia en train.

18/11 au 3/12 – Travail sur les mini-projets à Sophia-Antipolis, conférences (Filière H2, mobilité électrique, etc.)

2/12 – Présentation des résultats obtenus à la Région.

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Vous prendrez le TGV à 06h00 à la Gare de Lyon, direction Marseille, où nous serons basés pour trois jours de visites autour de la cité phocéenne. Nous rejoindrons ensuite Sophia-Antipolis, où vous serez logés dans une résidence étudiante reliée au site de l'Ecole par une ligne de bus régulière. Vous serez logés en appartements de 2 à 4 personnes, draps et serviettes seront fournies, et les appartements sont équipés d'une cuisine.

Contact

pedro.affonso_nobrega@mines-paristech.fr

robin.girard@mines-paristech.fr

PRESENTATION DETAILLEE

LE CO₂ : SON CAPTAGE, SON STOCKAGE ET SA VALORISATION

Coordinateurs : Elise El Ahmar (CTP), Irina Sin (Géosciences)

Centres de recherche concernés : Centre Thermodynamique des Procédés (CTP) et Centre de Géosciences

Lieu : 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau, France

RESUME :

Depuis plus d'un siècle, les activités humaines ont provoqué un accroissement des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), ce qui entraîne une augmentation de la part de rayonnement retenue dans l'atmosphère et un surplus d'effet de serre. Même si le CO₂ n'a pas le pouvoir de réchauffement global le plus important, la quantité de ses émissions fait de lui le GES le plus nuisible. Son captage, stockage géologique et sa valorisation (CSCV) consiste à récupérer le CO₂ émis en grande quantité lors de processus industriels tels que la production d'électricité, d'acier ou de ciment, pour le stocker dans le sous-sol afin de l'isoler de l'atmosphère, ou le réutiliser. Le CO₂ ainsi capté ne vient donc plus s'accumuler dans l'atmosphère et ne contribue plus à l'effet de serre ni au changement climatique.

Les élèves seront amenés à découvrir cette solution technologique prometteuse qui, allié à d'autres mesures, permet de réduire massivement le CO₂ émis par l'industrie et le secteur énergétique.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

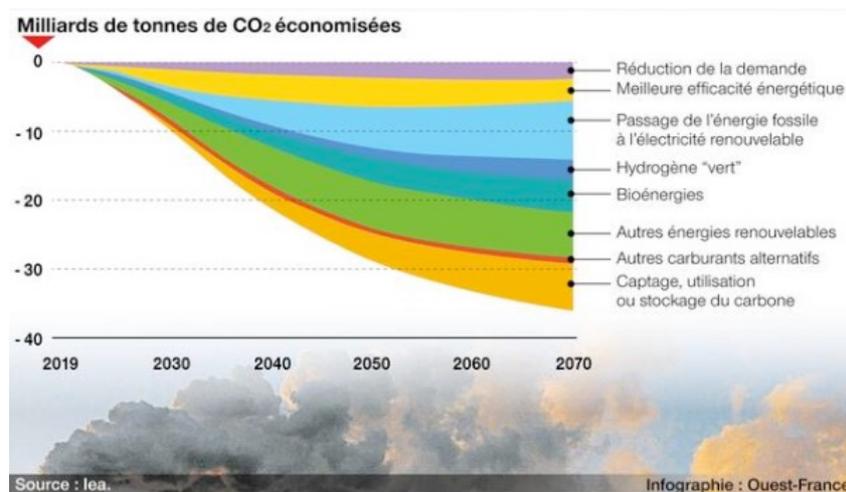
Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz incolore, inerte et non toxique, est le principal gaz à effet de serre (GES) à l'état naturel, avec la vapeur d'eau. Il représente 77% des émissions de GES d'origine humaine. Il résulte essentiellement de la combustion des énergies fossiles et du changement d'utilisation des sols (agriculture et déforestation). Il est surtout issu du secteur des transports (combustion de carburants), de l'industrie (utilisation d'énergies fossiles) et de l'habitat (utilisation d'énergie pour le chauffage, l'éclairage, ...). Sa durée de vie dans l'atmosphère est d'environ 100 ans. En cinquante ans, la quantité de CO₂ que l'humanité disperse chaque année dans l'air est passée de 15 à 36,8 milliards de tonnes. Dans ce total, la France pèse un peu plus de 1 % et la Chine presque 30 %.



Ce polluant peut-il être une ressource ?

Dans son scénario visant la neutralité carbone de la planète en 2070, l'agence internationale de l'énergie (AIE) estime qu'on ne pourra neutraliser totalement certains gros émetteurs de CO₂ : centrales à charbon, à fuel ou à gaz, usines produisant des métaux, des engrais, du ciment, raffineries pétrolières. Ceci parce que les équipements sont trop récents pour être retirés rapidement, ou bien parce que le processus chimique de production est émetteur (cas du ciment et de l'acier). Or elles émettent 20 % du CO₂ global (contre moins de 3 % pour le transport aérien).

Une des solutions proposées (Figure 1) pour parvenir à la neutralité carbone en 2070 selon l'AIE est de capter le CO₂ émis à la cheminée des usines et le neutraliser. Ce qu'on appelle le CSCV pour captage, stockage et valorisation du dioxyde de carbone. Il n'existe que 21 sites dans le monde équipés de CSCV, dont la moitié aux États-Unis d'Amérique. La neutralité carbone des activités humaines ne pourra être atteinte qu'en récupérant la part incompressible de CO₂, selon l'AIE.



Les principales techniques de captage du CO₂

Plusieurs procédés industriels de captage existent, en fonction de la nature des fumées à traiter (composition, température, pression). Ils relèvent de **trois catégories** principales (Figure 2) :

-Captage postcombustion

L'objectif est d'extraire le CO₂ dilué dans les fumées de combustion. Ce procédé peut s'intégrer aux installations existantes, en tenant compte de la place disponible au sol et des modifications de rendement induites.

-Captage par oxycombustion

Il s'agit de produire une fumée concentrée en CO₂ en modifiant le procédé de combustion qui repose sur l'utilisation d'oxygène pur à la place de l'air.

-Captage précombustion

Avec ce type de procédé, l'objectif est de produire et de capter le CO₂ avant même la phase de combustion. A partir du combustible, d'oxygène et de vapeur d'eau, on forme du dihydrogène H₂ qui alimente la combustion et du CO₂ qui est isolé.

Lors du traitement des fumées issues des combustions, **quatre technologies principales** sont utilisées :

- L'absorption : le gaz contenant les espèces à séparer est envoyé dans une colonne où il est mis en contact avec un solvant liquide qui dissout le gaz à séparer et permet de l'isoler du reste des fumées.
- L'adsorption : le procédé est le même que pour l'absorption mais le solvant est remplacé par un adsorbant solide et il y a passage du gaz à séparer vers l'adsorbant.
- La diffusion membranaire : sélection des molécules de CO₂ grâce à une membrane ne laissant passer que les molécules d'une certaine taille.
- La distillation cryogénique : manipulation des conditions de température et de pression des gaz pour aboutir à la liquéfaction du CO₂.

L'absorption et l'adsorption sont aujourd'hui les deux technologies les plus développées industriellement.

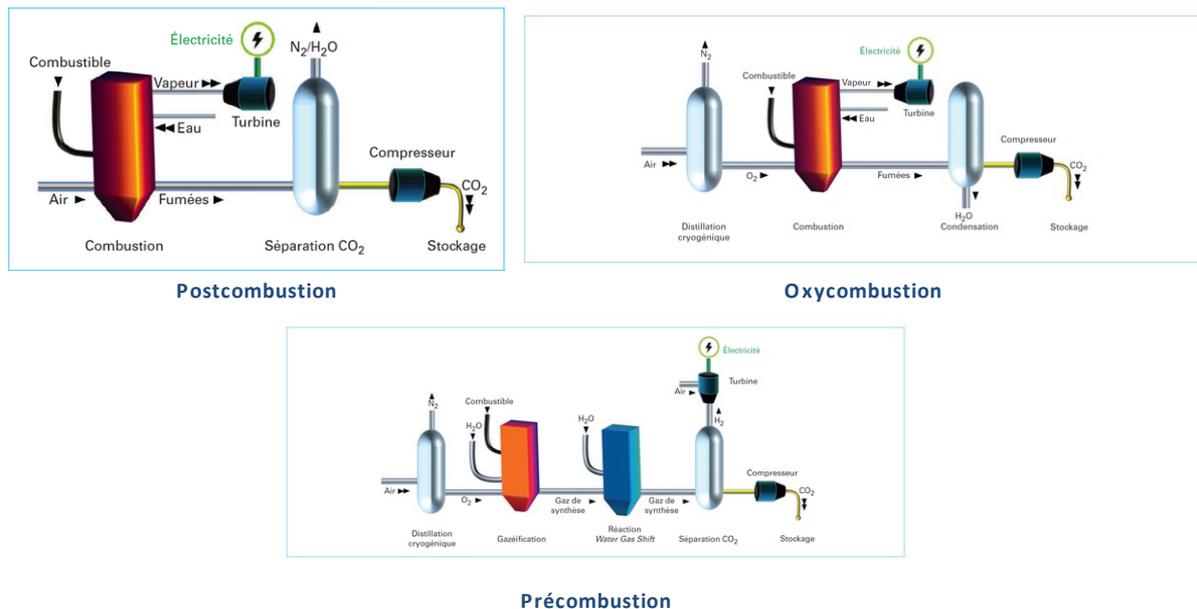


Figure 2. Principe d'un procédé de captage en post, oxy et précombustion (Techniques de l'ingénieur, Captage du CO₂ - Technologie pour la transition énergétique, Mai 2020).

Transport du CO₂

Après son captage, le CO₂ doit être dirigé vers son lieu de stockage ou d'utilisation. Compte tenu des volumes, les seules solutions possibles à grande échelle passent par l'utilisation des gazoducs (pipelines) ou des navires (le transport par camion ou train étant réservé à des volumes limités).

-Le transport de CO₂ par pipeline est prouvé depuis des décennies, notamment aux Etats-Unis d'Amérique avec plus de 6000 km de pipeline CO₂ en opération.

-Le transport maritime de CO₂ est quant à lui moins mature et actuellement seulement 5 navires au monde transportent de petits volumes de CO₂ (capacité des navires environ 1500 m³) pour l'industrie agroalimentaire. Une fois capté, le CO₂ doit être liquéfié afin de pouvoir le transporter de manière efficace. A la sortie de l'usine de liquéfaction, le CO₂ liquide est stocké dans des réservoirs de stockage temporaires. De ces réservoirs, il est chargé sur des navires de transport dédiés via un système de chargement puis transporté jusqu'à sa destination. Dans le cas d'un transport maritime de port à port, le CO₂ est déchargé dans un terminal à terre dans des réservoirs de stockage temporaires. Il est ensuite pompé et chauffé puis transporté par pipeline vers un site de stockage géologique.

Stockage géologique du CO₂

Le CO₂ capté et transporté est ensuite piégé dans des roches réservoirs, dans la structure géologique.

Types de stockages :

- Les aquifères salins profonds

Ces réservoirs d'eau salée impropre à la consommation représentent la capacité de stockage la plus importante allant jusqu'à 10 000 Gt de CO₂ d'après le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). A contrario, leurs structures sont souvent mal connues et nécessitent des études poussées, notamment pour vérifier l'intégrité du stockage sur le long terme.

- Les gisements d'hydrocarbures épuisés

Ces gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés sont des pièges d'hydrocarbures qui se sont montrés efficaces pendant des millions d'années et dont la structure est mieux renseignée. Mais ils présentent des volumes de stockage moindre que ceux des aquifères salins.

Par ailleurs, le CO₂ peut également être utilisé pour améliorer la récupération de certains hydrocarbures. La technique CO₂-EOR/EGR (Enhanced Oil Recovery/Enhanced Gas Recovery) est mise en place sur de nombreux sites d'exploitation.

- Les veines de charbon profondes inexploitées

Ces veines de charbon constituent un piège du méthane au sein de leurs matrices solides. Le méthane adsorbé peut être récupéré en utilisant du CO₂ qui restera fixé en retour, la technique est appelée CO₂-ECBM (Enhanced Coal Bed Methane).

Indépendamment du type de stockage, sa faisabilité techniques et l'intégrité sur le long terme doivent être démontrées en considérant les risques opérationnels ainsi que l'impact environnemental potentiel. Depuis ces trente dernières années, le stockage géologique de CO₂ a donné lieu à de nombreuses études et à la mise en place d'une vingtaine de projets dans le monde, dont la majorité est associée à l'exploitation d'hydrocarbures. Aujourd'hui, d'autres techniques, alternatives au stockage massif, sont également proposées pour des stockages à plus petite échelle : stockage dans les cavités salines et stockage de CO₂ dissous en aquifère.

Néanmoins, le stockage géologique pourra-t-il être suffisant ? En 2017, les émissions de CO₂ en France étaient de 350 Mt ; dans le monde à ce jour, les installations permettent de stocker 23 MtCO₂/an (source : ADEME).

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 (AIE, 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 et de carburants synthétiques, etc...

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

Le MIG sera piloté conjointement par deux centres de recherche de Mines ParisTech : Le Centre Thermodynamique des Procédés et le centre de Géosciences. 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 5 groupes afin de travailler sur différents aspects concernant le CSCV en répondant à différentes questions.

Groupe 1 : Décarbonation des procédés industriels (Adaptation des procédés qui permettent de réduire les émissions de CO₂) : Aspects économiques et environnementaux.

Groupe 2 : Captage, purification et valorisation du CO₂ : Quelles sont les verrous technico-économiques des techniques de captage ? Quelles pourraient être les nouvelles applications afin d'augmenter la part de CO₂ actuellement valorisé comme matière première.

Groupe 3 : Stockage géologique du CO₂ : Quelles leçons avons-nous appris après trente années de recherche et de développement ? Quels sont les verrous techniques ?

Groupe 4 : Captage et stockage du CO₂ : Quels scénarios pourraient être envisagés pour des émetteurs en France ? Comment et où stocker en France ?

Groupe 5 : CSCV : Combien coûte 1 tCO₂ capté, acheminé et stocké ? Évaluer la faisabilité technico-économique des scénarios.

LES VISITES

- Visite de SAS Méthatreil (première unité de production de biométhane en France à récupérer le CO₂ pour le réutiliser en culture maraîchère grâce au procédé Carlboliq développé par Cryocollect, Machecoul-Saint-Même).
- Visite de plateformes d'essais et d'équipements (BRGM, Orléans).
- Visite de Cryopur (entreprise qui transforme le biogaz, issu des déchets organiques, directement en bio-GNL (biométhane liquide) et en CO₂ liquide grâce à son procédé Cryo pur ; Massy).
- Visite des installations d'essais du centre de recherche Paris-Saclay (Air Liquide, Jouy-en-Josas).
- Visite des installations d'essais (Holcim, Lyon).

PROGRAMME PREVISIONNEL

Jours	Semaine 1 (du 15/11 au 19/11)	Semaine 2 (du 22/11 au 26/11)	Semaine 3 (du 29/11 au 03/12)
Lundi	9h00-17h30 / Mines Paris M : Présentation du MIG AM : CSCV (TOTAL)	9h30-17h30 / Mines Paris M : Captage et valorisation du CO ₂ (ENGIE) AM : Travail de groupe	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau M : Visite du CTP AM : Travail de groupe
Mardi	9h30-17h00 /Machecoul-Saint-Même Visite de Méthatreil : Procédé Carbolig	9h30-17h30 / Holcim (Lyon) Rencontre avec des experts du CSCV Visite des installations	9h00-17h00 / Air liquide (Saclay) Rencontre avec des experts du CSCV Visite des installations d'essais
Mercredi	09h00-18h00 / Mines Fontainebleau M : Présentation et discussion autour du développement durable (C. Descamps-Large, Mines ParisTech) AM : Recherche de documentaire	9h30-17h30 / Mines Fontainebleau M : Analyse du cycle de vie (P. Perez-Lopez, Mines parisTech) AM : Travail de groupe	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau Travail de groupe
Jeudi	9h00-17h00 / BRGM (Orléans) Rencontre avec des experts du CSCV Visite de plateformes d'essais et d'équipements	9h00-17h30 M : Travail de groupe (Mines Paris) AM : Visite Cryopur et présentation de la technologie (Massy)	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau Travail de groupe
Vendredi	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau M : Propriétés et diagrammes de phases de CO ₂ (E. El Ahmar) + Stockage géologique (I. Sin) AM : Travail de groupe+ Bilan 1ère semaine	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau M : Travail de groupe AM : Bilan 2 ^{ème} semaine	9h00-15h00/ Mines Paris Présentation des résultats

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
Portable : + 33 6 88 08 58 81

Dr. Irina Sin
Centre de Géosciences – Mines ParisTech
e-mail : irina.sin@mines-paristech.fr
Portable : + 33 6 34 61 81 65

Description détaillée

MIG FORENSIC

Coordinateur : Sébastien Travadel

Encadrants :

- Sébastien Travadel (CRC)
- Franck Guarnieri (CRC)
- Didier Delaitre (CRC)
- Xavier Alacoque (Centre de chirurgie pédiatrique de Toulouse)
- Mathis Bourdin (2A en césure au CRC), Matei Simtinica (élève en Master de *Computer Science* à Université Polytechnique de Bucarest, *visiting student*).

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

Lieux : Sophia Antipolis, Toulouse (CHU)

RESUME :

Le MIG FORENSIC étudie l'aide à la décision en chirurgie en temps réel selon deux volets, explorés en parallèle pour proposer une vision d'ensemble, soit : (i) le développement d'algorithmes de *Machine Learning* fondés sur des données réelles ; (ii) l'étude des questions éthiques soulevées par l'introduction de tels outils, en confrontant les performances des algorithmes à des enjeux de vie et de mort.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

Si la science des données, le « big data », l'apprentissage statistique (*Machine Learning*) et l'Intelligence Artificielle (IA) font désormais partie intégrante du paysage de l'ingénierie, la démarche de délégation de tout ou partie de la décision à un algorithme reste peu répandue en chirurgie. Cela s'explique d'une part par le peu de données disponibles ; d'autre part par la difficulté à développer une « IA responsable » au sens large, soit à répondre aux questions éthiques soulevées par des algorithmes utilisés pour des décisions critiques mais à la fiabilité relative.

L'étude de cas, proposée par le centre de chirurgie pédiatrique du centre hospitalo-universitaire de Toulouse, aborde ces deux volets de concert. Elle consiste à la fois : (i) à développer de premiers algorithmes de classification pour prédire des arrêts cardiaques au cours d'opération sur des enfants ; (ii) à étudier les conditions d'acceptabilité professionnelle d'outils de ce type.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

Selon leur choix (MIG FORENSIC « Data » ou MIG FORENSIC « Ethique »), les élèves seront répartis en deux groupes (voir le programme prévisionnel).

Un groupe étudiera des données réelles de surveillance des patients (« scope »), enregistrées durant plusieurs mois dans six blocs opératoires. Ce corpus de données présente des caractéristiques singulières, qui en rendent l'analyse ardue : nombre de cas limités, pathologies multiples, population variée (des bébés aux jeunes adultes). Il s'agit de prendre en main ces données selon toute la chaîne de traitement, pour développer de premiers algorithmes de classification capables de prédire au cours de l'opération des insuffisances cardiaques majeures susceptibles de perturber gravement le déroulé de la chirurgie, voire de menacer la vie du patient. Des cours introductifs au traitement du signal, à l'apprentissage statistique et à l'ingénierie logicielle en première semaine permettront d'approcher progressivement ce domaine.

Un autre groupe mènera des observations non participantes dans des blocs opératoires (CHU Toulouse, centre de chirurgie pédiatrique), ainsi que des entretiens non directifs auprès de médecins (une formation dédiée à ces techniques leur sera dispensée). L'objectif est de modéliser le processus de décision au cours de l'acte chirurgical, et de déterminer dans quelles conditions et dans quelle mesure cette décision pourrait être assistée par un outil à base d'apprentissage statistique. La confiance des experts envers un tel outil dépend notamment de sa fiabilité à long terme, et de son intelligibilité lorsque les prédictions contredisent l'intuition. Or, le plus souvent, la performance des algorithmes de classification s'accroît au prix d'une complexité significative, jusqu'à les transformer en « boîtes noires ». C'est notamment le cas des algorithmes d'Intelligence Artificielle qui ont atteint des performances supérieures à celles des meilleurs experts. Les élèves devront ainsi répondre à la question suivante : sur quelles bases éthiques peut-on envisager d'introduire en chirurgie une solution qui contreviendrait à l'expérience du médecin, face à des enjeux de vie et de mort ?

Chaque groupe devra s'organiser selon les principes du *Lean Management* (avec l'assistance d'une spécialiste de cette démarche). Les deux groupes devront en outre coordonner leurs travaux durant la seconde semaine, puis ils seront réunis en dernière semaine pour confronter leurs analyses et proposer une vision d'ensemble et un modèle d'aide à la décision en temps réel alimenté par les données de scope. Ils devront également dégager les grandes lignes pour concevoir à moyen terme des outils opérationnels en chirurgie.

En parallèle à ces travaux, une réflexion transversale sur l'ingénierie sera conduite par les élèves, pour porter un regard critique sur leur projet. Des séances de cadrage seront proposées à l'ensemble des MIGs sophiapolitains en début de séquence, puis un temps d'échange entre les élèves des MIGs sur Sophia Antipolis permettra de dégager les lignes directrices communes aux différentes questions d'ingénierie soulevées par chaque projet, au-delà de leur diversité thématique. Enfin, une séance de synthèse en fin de séquence mettra en perspective ce premier contact avec l'ingénierie, ses modèles et ses méthodes.

PROGRAMME PREVISIONNEL

Date	Matin	Après-midi
Dimanche 14		Départ en train pour Toulouse
Lundi 15	Présentation de la problématique de l'IA en chirurgie (hôpital Purpan)	Visite d'un bloc opératoire et présentation des moyens de surveillance (hôpital Purpan)
Mardi 16	Visite d'un centre de recherche en IA et imagerie médicale (CHI Toulouse)	Transfert à Sophia Antipolis (bus)
Mercredi 17	Introduction aux fondements de l'apprentissage statistique	
Jeudi 18	Présentation et mise en place des concepts du « Lean Management »	

Tronc commun

MIG FORENSIC DATA

Date	Matin	Après-midi
Vendredi 19	Traitement du signal	Ingénierie logicielle
Lundi 22	Projet (traitement des données)	
Mardi 23	Projet (modélisation)	
Mercredi 24	Echange entre MIGs sur les questions d'ingénierie	Intro à la biblio puis biblio sur du Machine Learning
Jeudi 25	Projet (analyse des données)	
Vendredi 26	Projet (analyse des données)	

MIG FORENSIC ETHIQUE

Date	Matin	Après-midi
Vendredi 19	Les paradigmes en médecine	Techniques d'entretien
Dimanche 23	Transfert à Toulouse	
Lundi 22	Observation et entretiens.	
Mardi 23	Observation non participantes et entretiens	
Mercredi 24	Observation non participantes et entretiens	
Jeudi 25	Modélisation de la décision en chirurgie	
Vendredi 26	Echange avec les médecins	Transfert à Sophia (bus)

Date	Matin	Après-midi
Lundi 29	Projet (synthèse), groupe entier	Définition d'un premier démonstrateur
Mardi 30	Définition d'un premier démonstrateur et des contours d'une solution à terme	
Mercredi 1er	Préparation du <i>Jupyter Notebook</i> et d'une note de synthèse	Présentation auprès des médecins
Jeudi 2	Finalisation du <i>Jupyter Notebook</i> et préparation du	Restitution devant les autres MIGs sphiapolitains

	rapport	
Vendredi 3	Session d'échanges sur l'ingénierie, à partir de l'expérience du MIG (tous les migs sphiapolitains)	
Samedi 4	Transfert sur Paris	

Tronc commun

Note : dans le cadre de la formation de l'ingénieur généraliste, des conférences seront proposées en fin d'après-midi la seconde semaine, sur les thèmes du solaire, de la détection des plastiques en mer et de l'hydrogène. Elles seront suivies en visioconférence par le groupe basé à Toulouse.

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

L'hébergement des MIGS sur Sophia 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

Tél : 06 47 93 17 25

Numérisation du système de santé : enjeux d'une médecine prise entre humanité et technicité

Coordinateurs : (2 max) Daniel Abergel

Encadrants : Alain Bessis, Mickaël Basson, Frédéric Kletz, Daniel Abergel

Centres de recherche concernés : Centre de gestion scientifique

Lieux : Paris

RESUME :

L'essor des outils numériques dans le champ de la médecine semble offrir d'immenses possibilités pour l'amélioration de la prise en charge des patients. Mais quels sont les effets réels et l'efficacité en termes d'amélioration de parcours de soin, de prise en charge des patients ? Ces approches ont-elles vocation à être universelles ou au contraire destinées à des situations particulières ? Dans quelle mesure et dans quelles circonstances ces nouveaux outils numériques contribuent-ils à une amélioration de la qualité des soins et de la relation soignant-soigné. Bref, y a-t-il à choisir entre technicité et humanité ? Ce MIG propose d'aborder ces questions sous le regard de l'ingénieur généraliste.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

L'irruption il y a une quinzaine d'années des technologies de l'information et de la communication dans le domaine de la santé a fait entrevoir un certain nombre de possibilités nouvelles pour la surveillance, notamment l'auto-surveillance, et la prise en charge des patients. Divers néologismes sont apparus, désignant des sous-domaines de cette médecine connectée. Ainsi la e-santé, définie comme « l'usage combiné de l'internet et des technologies de l'information à des fins cliniques, éducationnelles et administratives, à la fois localement et à distance », ou encore la m-médecine qui, elle, désigne « les pratiques médicales et de santé publique reposant sur des dispositifs mobiles tels que téléphones portables, systèmes de surveillance des patients, assistants numériques personnels et autres appareils sans fil ». En France, le terme de télémédecine recouvre divers aspects (télésurveillance médicale, téléconsultation, télé-expertise, téléassistance médicale, réponse médicale apportée dans le cadre de la régulation médicale).

Récemment, la crise covid a donné une accélération à ces moyens numériques dont beaucoup s'inscrivent, au-delà de la crise sanitaire, dans une évolution des techniques et des stratégies de prise en charge de la santé des patients. Il convient à présent, alors que la phase critique semble à présent en voie de résolution, d'évaluer les apports de ces instruments – tels que téléconsultation et dossiers médicaux numérisés, ou autres outils numériques mis en place par différents acteurs de la

santé (APHP, ARS, ...) - et les bénéfiques pour les patients et leurs soignants.

L'outil numérique peut en outre avoir des conséquences paradoxales sur la qualité du suivi et de la prise en charge des patients, lorsqu'il s'avère envahissant au détriment de la disponibilité des

soignants, voire de la qualité des soins, considérés comme un ensemble d'actes qui incluent le patient dans sa globalité et non seulement sa maladie.

En fin de compte, il s'agit d'évaluer dans ce cas particulier dans quelle mesure la technique peut être mise au service d'une médecine où la relation entre le patient et ses soignants demeure une préoccupation centrale.

Quelles sont les attentes liées à ces développements technologiques, et que peut-on réellement en attendre sur le plan de la prise en charge des patients ? Ce sont des questions non encore résolues aujourd'hui et très débattues, dans un contexte rapidement évolutif.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

Les objectifs sont introduits dans le paragraphe « mini-projets ».

La première semaine du MIG comportera essentiellement des conférences par divers intervenants, acteurs du domaine, qui vous permettront de couvrir l'essentiel du champ de l'étude.

La seconde semaine du MIG sera consacrée à l'approfondissement des divers aspects soulevés par les intervenants. Le travail s'effectuera en différents sous-groupes chargés chacun, après une réflexion commune permettant la **problématisation** des questions, d'une sous-thématique particulière, sous forme de mini-projets. Enfin, la troisième semaine sera le temps de la mise en forme de ces mini-projets, au cours de laquelle les sous-groupes contribueront **ensemble** à proposer des solutions concrètement envisageables. Ce travail vous permettra de mettre en valeur l'approche de l'ingénieur dans la résolution de ces problèmes complexes.

MINI-PROJETS

Il faudra au cours de ce travail bien saisir ce que représente la notion de parcours de soins, en comprendre les différents aspects et en identifier les points critiques, notamment ceux qui nécessitent amélioration. Il s'agira également de faire le point sur les types de difficultés rencontrées par un patient lors de son parcours de soins, dans l'hôpital, en ville et à l'interface ville-hôpital. Il conviendra d'identifier les aspects strictement médicaux et ceux liés aux structures de soins, et bien évidemment de prendre en compte les dimensions humaines et sociales.

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

- Proposer une analyse et une évaluation du dispositif de télémédecine ORTIF, son apport et son efficacité pour le suivi des patients
- Apprécier l'efficacité (amélioration du parcours de soin, qualité de suivi des patients)
- Quelles modifications de la pratique ces outils de télémédecine induisent-ils, avec quels avantages et limites éventuels pour les soignants ?
- Quels sont les apports et limites de l'outil ? Proposer des pistes éventuelles d'amélioration du dispositif et avec quels objectifs (pour les patients et les soignants)
- Identifier les points faibles et les difficultés éventuelles de fonctionnement

- Comment les demandes des utilisateurs sont-elles prises en compte?
- Quelle amélioration de la qualité du suivi des patients ?
- En quoi les outils numériques peuvent être récupérés par les patients et participer à la démocratie sanitaire prise en charge?
- Impact des outils de télémédecine pour la médecine de ville et à l'interface ville-hôpital

LES VISITES

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

PROGRAMME PREVISIONNEL

Le programme complet vous sera communiqué ultérieurement

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Daniel Abergel

Tel. : 01 44 32 32 65

email: daniel.abergel@ens.psl.eu



MIG SOLAIRE

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

Coordinateur : Philippe BLANC

Encadrants : Joris MASAFONT (doctorant ADEME, Ecole Nationale Supérieure de Paysage de Versailles, MINES ParisTech), Romain BESSEAU (ingénieur de recherche MINES ParisTech)

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



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 ;
- Visite du site PROMES à Odeillo (recherche sur la concentration solaire) ;
- 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 (PNR)

- 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)
- Romain BESSEAU (romain.besseau@mines-paristech.fr)
- Joris MASAFONT (joris.masafont@mines-paristech.fr).

TITRE : Transport de l'hydrogène.

Contexte : L'hydrogène gazeux «décarboné» peut être produit par électrolyse de l'eau grâce à de l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, des hydroliennes ou des réacteurs nucléaires. Le gaz ainsi produit devra être collecté et acheminé vers les centres de consommation. Il est envisagé d'utiliser les réseaux de distribution existants (la construction de nouveaux réseaux serait très onéreuse). Il est donc primordial d'évaluer les potentiels effets de l'hydrogène sur les propriétés mécaniques des aciers faiblement alliés utilisés pour la fabrication des tubes. Le MIG sera organisé dans le cadre de la chaire industrielle ANR «Mini-Eprouvettes pour le Suivi en Service des structures avec Application au transport d'Hydrogène» (MESSIAH).

Problématique /Enjeux : La volonté politique de développer l'hydrogène comme vecteur d'énergie (voir par exemple le plan stratégique pour l'hydrogène de la commission européenne) conduira à la production massive d'hydrogène gazeux qu'il faudra transporter sur de grandes distances. Il est envisagé d'utiliser une partie des réseaux de distribution de gaz (principalement le méthane) déjà existant. Les gazoducs ont été construits en acier sur une longue durée. Le réseau est ainsi constitué de pipes dits « vintage » posés dans les années 60 et de pipes récents. Par ailleurs l'hydrogène est connu pour fragiliser les aciers. Il convient donc, avant d'utiliser les réseaux actuels, de vérifier que ceux-ci sont aptes au transport de l'hydrogène pour les niveaux de pression partielle envisagés.

OBJECTIFS

- Comprendre et évaluer les évolutions du réseau gazier actuel afin de le rendre apte au transport de l'hydrogène
- Évaluer l'effet de l'hydrogène sur le comportement et la rupture des aciers de gazoduc.

Encadrement projet

- yazid.madi@mines-paristech.fr
- jacques.besson@mines-paristech.fr

Centre de recherche : Centre des Matériaux

Lieux : Paris, Evry, PACA.

MINI-PROJETS/ETUDES

- Enjeux économiques/technologiques du transport de H₂ dans le réseau actuel. (GRTgaz/Domaine du Rayol)
- Production d'hydrogène décarboné du réseau local au réseau national (Air Liquide/Domaine du Rayol).
- Evaluation de l'effet de l'hydrogène : acier « vintage » : Y. Madi, M. Tebib.
- Évaluation de l'effet de l'hydrogène : acier « moderne » : Y. Madi, M. Tebib
- Simulation du couplage chargement mécanique/diffusion de l'hydrogène : L. Lacourt, J. Besson

PROGRAMME PREVISIONNEL

Jours	Semaine 1 (du 15/11 au 19/11)	Semaine 2 (du 22/11 au 26/11)	Semaine 3 (du 29/11 au 03/12)
Lundi	9h-10h introduction (J. Besson/Y. Madi) 10h-12h Conférence d'introduction <i>Patrice Geoffron</i> <i>Université Paris Dauphine-PSL</i> 14h - 17h Recherche documentaire Formation aux outils de gestion de projet	Mini-projets (Y. Madi, J. Besson)	Mini-projets
Mardi	Visite Mannesmann Soir Départ → Antibes	Mini-projets	Mini-projets
Mercredi	Matin : PERSEE Après midi : domaine de Rayol	Mini-projets	Mini-projets
Jeudi	Matin : domaine de Rayol Après-midi : JUPITER 1000 soir retour Paris	Mini-projets	Mini-projets
Vendredi	Matin : Frédéric Legrand (ENGIE) Hydrogène, Modes de production, Marché actuel; Projection du marché et des usages Après-midi : Tanguy Manchec – Sylvain Lemelletier (GRTgaz) Utilisation du réseau gazier existant pour le transport de l'hydrogène	Mini-projets	9h00-15h00 M : Présentation des résultats AM : Présentation des résultats / Mines Paris

MIG

Infrastructures souterraines - Conception du tunnel

Euralpin Lyon-Turin

En partenariat avec EGIS et TELT

Coordinateurs : Faouzi Hadj-Hassen et Isabelle Thénevin

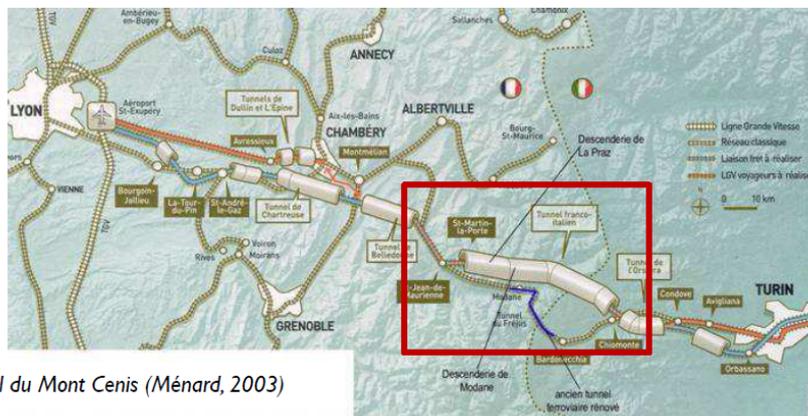
Encadrants : Faouzi Hadj-Hassen, Isabelle Thénevin, Bruno Tessier, Damien Goetz, Michel Duchêne, Hedi Sellami et Emmanuel Ledoux

Centre de recherche concerné : Géosciences

Lieux : Fontainebleau, Paris et Modane

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



Tunnel du Mont Cenis (Ménard, 2003)

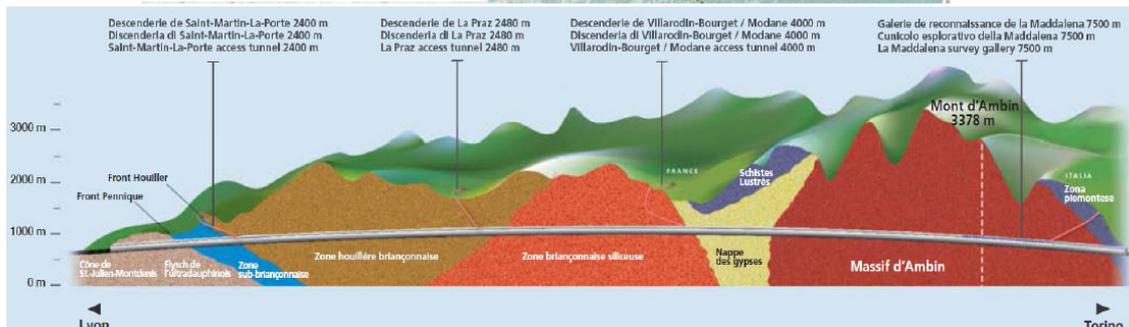


Figure 1 : Tracé du tunnel Euralpin Lyon-Turin (TELT)

1. Contexte et problématique

Le développement du marché unique européen nécessite la réalisation d'infrastructures nouvelles permettant de répondre à l'augmentation des échanges entre les pays de l'union européenne. De telles réalisations doivent évidemment répondre aujourd'hui à des normes de qualité et d'exigences qui s'inscrivent dans la notion de développement durable.

Le massif alpin dans sa dimension européenne, depuis la France jusqu'en Autriche, constitue une barrière naturelle et donc un frein à une intégration optimale des réseaux de transports entre les pays riverains et plus largement entre le nord et le sud de l'Europe. Le projet du Tunnel Euralpin Lyon-Turin se présente donc comme une réalisation majeure d'aménagement

du territoire européen avec comme pièce maîtresse un tunnel bitube de 57 km de longueur qui franchira les Alpes franco-italiennes à une profondeur comprise entre 500 et 800 m, sous un recouvrement qui atteindra localement un maximum de 2500 m.

Compte tenu de l'ampleur de l'ouvrage et de ses conditions de réalisation, cette nouvelle liaison Lyon-Turin apparaît donc comme un projet profondément novateur qui requiert une attention particulière sur les plans technique, économique et environnemental. Des retombées scientifiques sont également attendues sur le plan géologique dans la mesure où l'ouvrage traversera le cœur de la chaîne alpine.

2. Enjeux des infrastructures souterraines de transport

La circulation des personnes et des biens entre les divers pays membres de l'union européenne ne fait que progresser. Ces échanges accrus nécessitent impérativement le développement d'infrastructures de transport qui assureront un développement économique approprié et une réelle intégration de tous les pays européens.

Les Alpes restent une barrière naturelle, difficile à franchir. Dans ce contexte, le tunnel apparaît comme une infrastructure permettant un transit rapide des biens et des personnes. La conception d'un nouveau tunnel sous les Alpes franco-italiennes relève fondamentalement d'une analyse des besoins et de son intégration dans un réseau d'échanges européens, ce qui nécessite d'examiner les projets équivalents en Allemagne, Suisse, Italie et Autriche.

Dans le cadre d'un tunnel de grande longueur, les enjeux relèvent à la fois de la mise en œuvre (creusement, phasage des travaux), mais également des systèmes d'exploitation et notamment ceux en charge de la sécurité. L'accident survenu dans le tunnel du Mont Blanc a eu comme conséquence d'imposer des modifications et/ou des renforcements des systèmes de sécurité dans les longs tunnels routiers. Les tunnels ferroviaires ne sont pas non plus à l'abri d'incidents graves, comme en témoigne l'incendie du tunnel sous la Manche.

L'infrastructure de transport doit désormais répondre à des exigences qui apparaissent souvent antagonistes : elle doit être souple à l'usage, génératrice de gain de temps, être sûre et avoir des impacts limités sur l'environnement. Par ailleurs, ce type d'ouvrage n'a quasiment aucune chance d'être rentable dans une stricte approche financière, mais sa réalisation se justifie par une approche socio-économique plus globale se développant sur le long terme.

3. Objectif et organisation du MIG

Le tunnel Euralpin Lyon Turin est divisé en plusieurs parties (lots) et sa construction nécessite le creusement de 4 galeries reliant la surface à la partie souterraine (descenderies, Figure 1). La descenderie de Villarodin-Bourget-Modane (VBM) est déjà creusée et permettra la réalisation du site de sécurité d'Avrieux. Ce site présente un panel varié d'ouvrages souterrains à construire pour permettre la circulation des trains et leur maintenance ainsi que l'accès aux secours : tunnel en fer à cheval, réalésage, puits et cavités de grandes sections (Figure 2). Le MIG proposé porte en particulier sur ce site dont la construction est actuellement en cours sous maîtrise d'œuvre d'EGIS.

L'objectif général de la formation est de faire découvrir aux élèves un projet d'une grande infrastructure souterraine sous ses divers aspects : expression du besoin et conception générale du projet, reconnaissance et caractérisation du milieu souterrain, dimensionnement des ouvrages et choix des techniques de réalisation, difficultés d'exploitation de ce type d'ouvrage et conditions de sa sécurité, analyse du bilan socio-économique et environnemental...

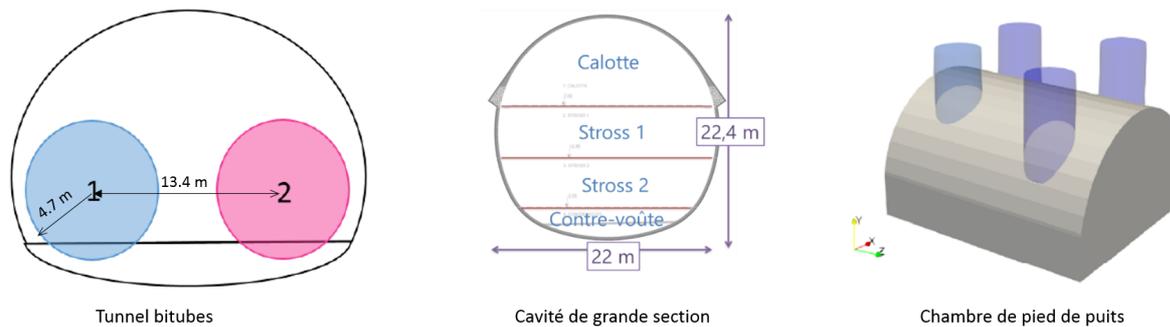


Figure 2 : Exemples d'ouvrages du site de sécurité d'Avrieux

Le MIG sera réalisé en 3 semaines bloquées du lundi 15 novembre au vendredi 3 décembre 2021. 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 partenaires industriels et institutionnels. Dans les 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.

3.1 Contenu des mini-projets

Le travail sera organisé autour de 6 mini-projets menés par petits groupes de 4 à 5 élèves qui les amèneront à rassembler les différents éléments de la réflexion en vue d'une synthèse générale.

Mini-projet 1 : Contexte et enjeux du projet TELT (Bruno Tessier, Isabelle Thévenin et Emmanuel Ledoux)

Ce mini-projet sera dédié au contexte général et aux enjeux du projet TETL par rapport à la politique européenne de développement d'infrastructures de transport entre les pays membres et la notion de développement durable. Des projets équivalents en Europe et dans d'autres pays seront examinés à titre de comparaison. Une analyse quantifiée comprenant plusieurs scénarios possibles permettra d'établir les calendriers de trafic et d'élaborer des programmes d'exploitation prévisionnels. La seconde partie sera consacrée à la caractérisation du site de sécurité d'Avrieux qui sera traité en détail dans le MIG. Les principales données de ce site nécessaires aux différentes analyses et modélisations seront rassemblées. Elles couvrent les plans des ouvrages envisagés, les propriétés géologiques, hydrogéologiques et géomécaniques du milieu souterrain et le cadre socio-environnemental du tunnel.

Mini-projet 2 : Dimensionnement géotechnique des ouvrages (Faouzi Hadj-Hassen et Gabriel Lopard EGIS)

Des travaux pratiques seront réalisés au début de ce mini-projet au laboratoire du centre de Géosciences de Fontainebleau pour permettre aux élèves de comprendre les principales données nécessaires à un dimensionnement géotechnique. Les propriétés rassemblées dans le mini-projet 1 seront alors analysées pour pouvoir en déduire les valeurs utilisables à l'échelle du site. La variété des ouvrages du site de sécurité d'Avrieux amène à étudier les configurations suivantes : tunnel bitube, cavité de grande section et puits (Figure 2). Des modèles analytiques et numériques seront mis en œuvre pour le dimensionnement de ces ouvrages et leurs soutènements à la fois avec l'approche du milieu continu (éléments finis) ou discontinu (mécanique des blocs).

Mini-projet 3 : Méthodes de creusement (Michel Duchêne et Hedi Sellami)

Les ouvrages du site d'Avrieux seront effectués avec deux méthodes différentes : l'abattage mécanique au moyen d'un tunnelier lors du creusement du bitube, et l'abattage à l'explosif lors du creusement des cavités de grandes sections. Dans les deux cas, des conférences introductives seront effectuées pour expliquer chaque méthode et le principe de son dimensionnement. Le travail à réaliser consiste à établir les spécifications techniques du tunnelier (dimensions, outils d'abattage, puissance, performance...) ainsi que les différents schémas de tir à l'explosif lors du creusement des grandes cavités (foration, type d'explosif et amorçage, séquence du tir, sections divisées, vibration...). Ce mini-projet comprend aussi la définition des équipements nécessaires au creusement.

Mini-projet 4 : Aérage, risque et incendie (Damien Goetz et Faouzi Hadj-Hassen)

L'aérage des différents ouvrages pendant la phase de creusement et d'exploitation constitue un aspect technique important à étudier. Pendant la phase de creusement, cela passe par l'inventaire des gaz d'échappement des différents équipements utilisés et la détermination de la quantité d'air nécessaire par rapport aux normes en vigueur. Pendant la phase d'exploitation du tunnel, le problème majeur porte sur le bilan thermique : quelle chaleur est apportée dans le tunnel par les différents équipements ? Comment cette chaleur peut-elle être évacuée (conduction dans le massif rocheux ? évacuation par l'air de la ventilation ?...). Le second volet important dans ce mini-projet concerne la sécurité du tunnel durant la phase d'exploitation. Une analyse des divers risques encourus sera conduite (incendie, coupure d'électricité, séismes...) et les moyens de remédiation proposés.

Mini-projet 5 : Cadre législatif, sociétal et environnemental (Isabelle Thévenin, Bruno Tessier et Emmanuel Ledoux)

La première étape dans ce mini-projet consiste à prendre connaissance de la réglementation qui régit la construction d'une infrastructure souterraine de transport aussi importante que celle de la liaison Lyon-Turin. L'impact environnemental d'une telle infrastructure peut être examiné à deux niveaux. Le premier concerne la phase de chantier : infrastructures et concentrations humaines, évacuation des déblais (rotation des camions), stockage de déblais (estimation des volumes, nature des roches, modalités du stockage, problèmes de stabilité des versants, interactions eau-roches...). Le second niveau concerne la phase d'exploitation : gains en termes de pollution (gaz d'échappement, bruit, ...) liés à la diminution du trafic routier (fret routier versus fret ferroutage), réduction des dommages aux biens et aux personnes (accidents routiers). Par ailleurs, les éventuels effets négatifs générés par l'exploitation du tunnel seront également identifiés. L'acceptabilité sociétale sera traitée en collaboration avec les partenaires industriels du MIG en analysant les données disponibles sur des enquêtes publiques et l'intérêt que présente le projet.

Mini-projet 6 : Enjeux socio-économiques du projet (Damien Goetz et Faouzi Hadj-Hassen + EGIS et TELT)

Une analyse socio-économique sera effectuée moyennant des simulations prenant en compte le coût global de l'investissement pour la construction du tunnel et la valeur " monétarisée " des gains environnementaux et de réduction de dommages aux biens et aux personnes. Cette analyse s'appuiera notamment sur une estimation du coût actuel pour un transit fret de Lyon à Turin via les infrastructures existantes.

3.2 Organisation

Comme souligné ci-dessus, la semaine 1 sera consacrée à l'acquisition des connaissances en s'appuyant sur les conférences et les visites effectuées ainsi que les échanges avec les 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 15/11 Paris	- Présentation du MIG (F. Hadj-Hassen) - Le projet du tunnel Euralpin Lyon Turin (EGIS ou TELT) - Visite d'un chantier du Grand Paris (EGIS)
Mardi 16/11 Villeparisis Paris	- Visite de l'exploitation à ciel ouvert de gypse (Bois Gratuel, Placo) - Visite de la carrière de Bernouille (Placo) - Recherche documentaire (P. Nalon)
Mercredi 17/11 Annecy	- Départ en train vers Annecy - Visite EGIS
Jeudi 18/11 Modane	- Visite halle de Modane + descenderie de Modane (TELT + EGIS) - Visite dépôts des déblais + Laboratoire d'incendies (TELT)
Vendredi 19/11 Saint Martin Laporte	- Visite descenderie Saint Martin La Porte + carothèque (TELT) - Retour à Paris

Semaine 2

Lundi 22/11 <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 23/11 <i>Fontainebleau</i>	
Mercredi 24/11 <i>Fontainebleau</i>	
Jeudi 25/11 <i>Fontainebleau</i>	
Vendredi 26/11 <i>Fontainebleau</i>	Synthèse des mini-projets 1 à 3 et restitution Coordination des résultats en vue des mini-projets 4 à 6.

Semaine 3

Lundi 29/11 <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 30/11 <i>Paris et Fontainebleau</i>	
Mercredi 01/12 <i>Paris et Fontainebleau</i>	
Jeudi 02/12 <i>Paris et Fontainebleau</i>	
Vendredi 03/12 <i>Paris</i>	Synthèse des mini-projets 4 à 6 et restitution Préparation du plan du rapport final

Référence

<https://www.telt-sas.com/fr/telt-page-accueil/>

<https://egis.fr/>

Le verre : enjeux environnementaux de son élaboration et procédés de coloration et de renforcement mécanique

Coordinateurs :

Encadrants : Franck Pigeonneau et Romain Castellani

Centres de recherche concernés : CEMEF et OIE

Lieux : Paris et Sophia Antipolis

RESUME :

Le verre est un matériau solide amorphe qui présente de nombreuses particularités quasi uniques. Obtenu par fusion d'oxydes, son élaboration nécessite de hautes températures. De plus, l'utilisation de matières premières carbonatées conduit à une libération de CO₂ non négligeable. Le verre étant considéré de fait comme un des matériaux du futur, l'industrie verrière fait face à des enjeux majeurs dans les domaines de l'énergie et l'environnement qui seront au cœur de ce MIG. Les mini-projets permettront de mettre l'accent sur les aspects de recyclabilités, de coloration et de renfort mécanique.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

Le verre est un matériau que l'on rencontre dans beaucoup de produits et d'objets du quotidien. En 2016, l'Europe a produit 34,5 millions de tonnes de verre, soit plus de deux fois la production d'acier. Insensible au recyclage, le verre peut être refondu et mis en forme à l'infini. Produire un verre respectant l'environnement sera au cœur de ce MIG.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

L'objectif est d'analyser le secteur du verre creux, premier producteur de verre en Europe et en France. On cherchera à explorer des pistes visant à réduire l'apport de matières premières et maximiser le recyclage. La faible flexibilité de la production du verre rend parfois difficile les changements de couleur par exemple.

MINI-PROJETS

La production des bouteilles en verre est le marché verrier le plus important en termes de volume. Le premier mini-projet vise à analyser leur cycle de vie. Il permettra de lister les enjeux actuels de ce marché tant sur le recyclage que les fonctionnalités.



Figure 1 : Exemple de bouteilles d'usage courant.

Le mini-projet 2 aura pour objectif d'étudier le potentiel du recyclage du verre. Son intérêt sera tout d'abord évalué en étudiant les aspects de bilan énergétique et de réduction d'émission de CO₂. L'objectif de 100 % de verre recyclé sera étudié concrètement à l'aide de réalisations expérimentales. La fusion de verre recyclé sera analysée par des essais modèles de fusion de poudre de verre en creuset comme illustré sur la figure 2. Le nombre de bulles formées lors de la refusion de verre sera étudié en fonction du temps et de la température. La photo de droite de la figure 2 illustre la présence de bulles après fusion dans des conditions particulières de réalisation. Une étude sur la nature du verre (blanc, foncé) sera faite.

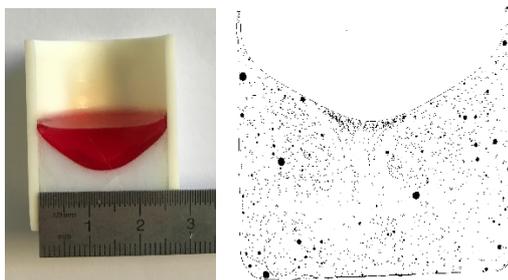


Figure 2 : Creuset et image de la section droite montrant les bulles piégées.

La coloration des verres est réalisée depuis de nombreuses années dans les cathédrales et autres édifices. La figure 3 montre en exemple vitraux du marché couvert de la ville de Sao-Paulo au Brésil. Les verres de couleur sont également d'intérêt dans les emballages mais trouvent aussi des applications dans l'art de table et les produits de luxe. La coloration du verre après fusion trouve aussi son intérêt pour rendre plus flexible, moins soumise aux variabilités, la production de verre. Ainsi, le mini-projet 3 portera sur la manière de colorer un verre. Des expériences à échelles réduites seront réalisées en parallèle de simulations numériques.



Figure 3 : Vitraux du marché couvert de Sao-Paulo au Brésil.

Finalement, le verre est connu pour sa fragilité. La figure 4 représente le détail d'une zone de fracture observé au microscope électronique à balayage. Le verre peut être rendu plus résistant en réalisant des trempes thermique ou chimique. Le mini-projet 4 aura pour but de voir comment faire ce renfort mécanique. Les deux techniques de renforcement seront analysées théoriquement. De plus, des expériences serviront à évaluer l'efficacité des techniques de trempes.

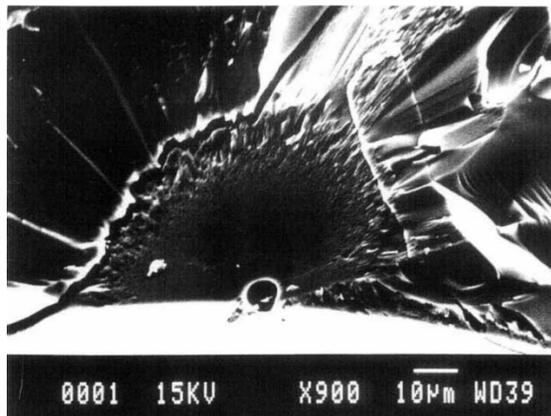


Figure 4 : Image MEB d'une micro-fracture d'un verre.

LES VISITES

Au cours de la première semaine, une visite au centre de recherche de Saint-Gobain à Aubervilliers sera organisée pour voir à l'échelle laboratoire comment les verres sont formulés et élaborés avant les essais industriels. Le marché du verre plat pour l'habitat et l'automobile sera abordé grâce à la visite de l'usine de verre plat de Saint-Gobain Glass à Chantreine (60). La visite du site Créatech de Pochet du Courval est également programmée. Une visite de l'usine Saverglass, fabricant des bouteilles pour les spiritueux, est de même prévue à Feuquières (60). Enfin, à Sophia Antipolis, une visite de la verrerie de Biot sera organisée de sorte à voir un aspect plus artistique de la réalisation d'objets en verre.

PROGRAMME PREVISIONNEL

	Matin	Après-midi
Lundi 15 nov.	Introduction au verre et à son élaboration, séminaire de Xavier Capilla (Institut du verre)	Visite de Saint-Gobain Recherche, Aubervilliers
Mardi 16	Introduction aux phénomènes de transferts Séminaire de Jean-Marc Flesselles (ISOVER, Saint-Gobain)	Visite de Pochet du Courval, Clichy
Mercredi 17	Visite de la ligne float de Saint-Gobain Glass et de l'usine Sekurit	Visite de la ligne float de Saint-Gobain Glass et de l'usine Sekurit
Jeudi 18	Introduction à la mécanique des fluides numérique Séminaire de Corinne Payen (Verallia)	Introduction à la mécanique des verres Séminaire d'Allan Fredholm (Corning)
Vendredi 19	Visite de Saverglass (Feuquières)	Visite de Saverglass (Feuquières)
Voyage pour Nice		
Lundi 22 nov.	Accueil et présentation des mini-projets	Mini-projets
Mardi	Mini-projets	Mini-projets
Mercredi	Visite de la verrerie de Biot	Mini-projets
Jeudi	Mini-projets	Mini-projets
Vendredi	Mini-projets	Mini-projets
Voyage pour Nice		
Lundi 29 nov.	Mini-projets	Mini-projets
Mardi	Mini-projets	Mini-projets
Mercredi 1 ^{er} déc.	Mini-projets	Mini-projets
Jeudi	Synthèse et rédaction	Synthèse et rédaction
Vendredi	Synthèse et rédaction	Synthèse et rédaction

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

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

- **Coordinateurs :** Franck PIGEONNEAU franck.pigeonneau@mines-paristech.fr
Tél. : 04 93 95 74 34
Romain Castellani romain.castellani@mines-paristech.fr
Tél. : 04 93 95 89 51
- **Animateurs :** Paula Perez Lopez : paula.perez_lopez@mines-paristech.fr
Tiphaine Houdard : tiphaine.houdard@mines-paristech.fr
Thibaut Robine : thibaut.robine@mines-paristech.fr
- **Voyages :** Sylvie Massol sylvie.massol@mines-paristech.fr
Tel : 04 93 95 74 17

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.