

2021

Mines in transition

Mines in transition

Depuis sa création en 1783, Mines Paris - PSL investit les champs d'action correspondant aux grandes questions techniques et économiques de son temps. Conjuguer ambition académique pluridisciplinaire et proximité avec les entreprises est également une des forces de l'Ecole. Face au défi de l'urgence climatique décrite rapport après rapport par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), cela lui permet de développer une vision d'ensemble fondée sur des expertises scientifiques sans cesse confrontées aux réalités industrielles, économiques et sociales, et d'appréhender avec pertinence les enjeux d'une transition d'une nature et d'une ampleur inédites.

La transition : Un axe fort de l'enseignement et de la recherche à Mines Paris

L'engagement fort de Mines Paris en faveur du développement durable et de la question de la transition se traduit dans la politique scientifique de ses centres de recherches et dans son offre d'enseignement particulièrement riche (cycle ingénieur civil, masters, mastères spécialisés, doctorat, formation continue, corps des Mines, cycle ingénieur en apprentissage). La suite de ce document propose un aperçu des réalisations de l'Ecole dans cet axe.

Liste des centres de recherche de Mines Paris

Sciences de la terre et de l'environnement

Centre de géosciences (GEOSCIENCES)
Institut Supérieur d'Ingénierie et Gestion
de l'Environnement (ISIGE)

Energétique et procédés

Centre Efficacité énergétique des Systèmes
(CES)
Centre Thermodynamique des Procédés (CTP)
Centre Observation, Impacts, Énergie (O.I.E.)
Centre Procédés, Energies Renouvelables,
Systèmes Energétiques (PERSEE)

Mécanique et matériaux

Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF)
Centre des matériaux (MAT)
Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS)

Mathématiques et systèmes

Centre Automatique et Systèmes (CAS)
Centre de Robotique (CAOR)
Centre de Bio-Informatique (CBIO)
Centre de Mathématiques Appliquées (CMA)
Centre de Morphologie Mathématique (CMM)
Centre de Recherche en Informatique (CRI)

Economie, management et société

Centre d'Economie industrielle (CERNA)
Centre de Gestion Scientifique (CGS)
Centre de recherche sur les Risques et les
Crises (CRC)
Centre de Sociologie de l'Innovation (CSI)

LA TRANSITION EN 1^È ANNÉE DE CYCLE INGENIEUR CIVIL

Les MIG « Métiers de l'ingénieur généraliste »

Dans cet enseignement par projet, les étudiants du cycle ingénieur civil 1^{er} année découvrent un domaine scientifique dans sa complexité à travers des visites industrielles, des cours et des conférences ainsi que dans la réalisation d'un projet ambitieux en équipe d'une quinzaine. Mis en situation dans un centre de recherche de Mines Paris et en entreprise, ils doivent apporter des réponses à des questions transversales, techniques, économiques et sociétales, qui puisent abondamment dans les thématiques liées à la transition (par exemple le transport du dihydrogène, l'énergie solaire, les nouvelles mobilités électriques, les gaz renouvelables au cœur de la transition énergétique).

L'UE 14

Créée en Septembre 2019, cette unité d'enseignement "Terre et Société" du premier semestre du cycle ingénieur civil 1^{er} année comprend les modules suivants :



L'enseignement « Géosciences et Anthropocène », consacré à l'apprentissage de la démarche géoscientifique (observation, déduction, modélisation), qui consiste en une semaine de terrain dédiée à l'observation d'objets géologiques et de l'impact de l'activité humaine sur l'environnement.



L'enseignement « Questions Socio-politiques et Environnementales », alternance de cours et de petites classes consacrées à des synthèses de lecture d'ouvrages de référence, qui a pour objectif d'apporter une initiation à la sociologie, en appuyant les réflexions sur des questions relatives au développement durable.



L'enseignement « Energie et Changement Climatique » :

- un cycle de 5 conférences animées par des experts reconnus sur les relations entre changement climatique et impacts environnementaux d'une part, et divers aspects du fonctionnement de nos sociétés (ressources en eau, agriculture, biodiversité, migration de populations, financement du changement climatique) d'autre part ;
- les mini-projets réalisés par des groupes de 4 ou 5 élèves sur un sujet lié à l'énergie et aux enjeux environnementaux au sens large.

RELEVER LE DÉFI CLIMATIQUE



Après en avoir révélé l'existence et confirmé l'origine anthropique, les géosciences analysent le réchauffement climatique, sa dynamique et ses conséquences, à toutes les échelles spatiales et temporelles. Mais, face à ce défi sociétal, ce sont désormais toutes les disciplines qui doivent collaborer à la recherche de solutions permettant de réaliser efficacement la transition vers un monde décarboné. Une exigence de pluridisciplinarité qui fait partie de l'ADN de Mines Paris, dont les laboratoires de recherche couvrent des domaines allant des sciences dures aux sciences humaines.

Modélisation et prospective

La modélisation joue un rôle clé dans l'évaluation de la dynamique climatique et la prise en compte de l'influence des activités humaines dans ce processus. Ainsi, avec le réchauffement climatique, les épisodes extrêmes sont appelés à devenir plus fréquents. L'un des enjeux est de construire des scénarios d'occurrence de ces événements climatiques et d'en évaluer les impacts écologiques, épidémiologiques ou économiques afin, par exemple, d'adapter notre agriculture et nos aménagements pour les rendre plus résilients au changement climatique.

Pour la planification à long terme, c'est la modélisation prospective qui est devenue incontournable. Cette discipline associe le calcul économique, l'utilisation de modèles mathématiques et la réflexion stratégique pour élaborer des scénarios de décarbonation réalistes –tenant notamment compte des tensions sur les matières premières– ou encore évaluer l'efficacité des politiques de lutte contre le changement climatique.

Géosciences

Travaux de recherche visant à quantifier l'amplitude, l'extension spatiale et temporelle ou encore la périodicité des extrêmes climatiques. Ces travaux mobilisent les sciences de la donnée et en particulier les géostatistiques, qui évoluent pour prendre en compte l'aspect temporel et l'impact des valeurs extrêmes.

Applications à l'évaluation de la biodiversité.

La **chaire Geolearning** (avec l'INRAE) a pour objectif de développer des méthodes et des outils efficaces pour traiter les données spatialisées et temporelles afin d'évaluer les impacts et quantifier les risques associés aux changements climatiques en cours.

CMA

La **Chaire Modélisation prospective au service du développement durable**, créée en 2008 (et renouvelée deux fois depuis) à l'initiative du CMA et du CIRED (Ecole des Ponts ParisTech) avec comme partenaires l'ADEME, EDF, GRTgaz, RTE, SCHNEIDER ELECTRIC et TotalEnergies, décline des scénarios de long terme pour éclairer la décision dans le contexte énergie/climat.

Perspectives de développement de la bioénergie

Une thèse soutenue en 2015 s'attache à analyser l'évolution de la production de bioénergie au regard des politiques d'incitation, des échanges de ressources en biomasse et de leur utilisation soutenable à long terme dans un contexte de décarbonation des sociétés. Ce travail présente en particulier le positionnement actuel de la bioénergie, les stratégies mises en œuvre pour son développement et porte également sur une meilleure implémentation de la bioénergie dans le modèle d'optimisation du système énergétique mondial, TIAM-FR, développé au CMA.

CSI

Étude du processus de production des scénarios climatique, notamment ceux du groupe III du GIEC consacré à la réduction des émissions de gaz à effet de serre: cartographie des expertises en présence, analyse du mode de sélection des hypothèses de travail.

O.I.E.

L'intégration massive d'énergies renouvelables (EnR) dans le mix électrique pour répondre aux objectifs de la transition énergétique nécessite une évaluation systémique et multicritère des impacts environnementaux associés tout au long de leur cycle de vie. La méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) dynamique développée dans une thèse soutenue en 2019 a permis une analyse exhaustive des impacts de scénarios énergétiques dans un contexte insulaire et prospectif. La méthode a également été transposée au contexte de la France métropolitaine et valorisée lors d'une collaboration avec RTE dans le cadre du Bilan Prévisionnel 2050.

Une modélisation précise est primordiale dans les analyses prospectives afin de prendre en compte la variabilité des énergies renouvelables sur différentes échelles spatiales et temporelles. Pour cela, O.I.E. a travaillé à la conversion de différentes données climatiques en indicateurs de production d'énergies photovoltaïques et éoliennes, notamment dans le cadre du projet Climzpower, en collaboration avec le CMA, et du service climatique C3S Energy, qui assure une fourniture opérationnelle d'indicateurs énergétiques fondés sur des données Copernicus : <https://climate.copernicus.eu/operational-service-energy-sector>.

Le passé géologique éclaire l'avenir

Au cours des 30 derniers millions d'années, des épisodes géologiques de réchauffement global, rapides et intenses, se sont déroulés sur différentes échelles de temps. Ces optimums climatiques peuvent servir d'analogues du changement climatique en cours. Leur étude, qui bénéficie de l'amélioration constante de la résolution des méthodes analytiques (analyse isotopique), révèle les conséquences sur la biosphère et sur la dynamique sédimentaire. Elle peut permettre de comprendre l'évolution des plaines alluviales sous l'effet du changement climatique, des questions cruciales quand on sait qu'une partie importante de la population habite dans ces régions.

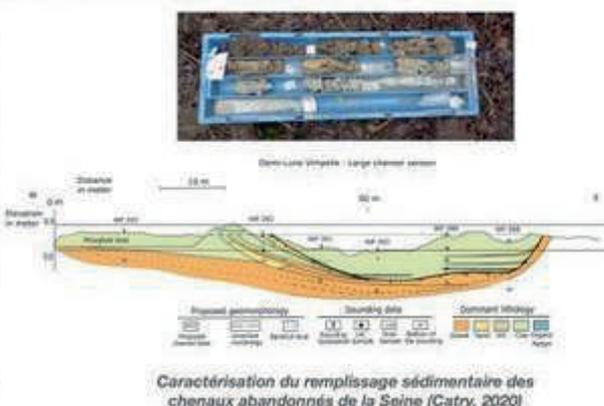
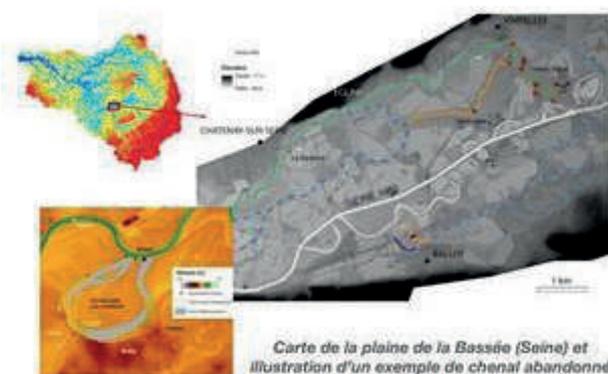
Dynamique des plaines alluviales et processus d'abandon des chenaux méandriformes de la Seine → Projet Piren Seine (J.-L. Grimaud & D. Huyghe)



Etude de la dynamique de la Seine depuis le dernier maximum glaciaire

- Cause(s) de l'abandon des chenaux à méandres dans les plaines alluviales?
- Existence d'une contribution climatique dans le processus d'abandon?
- Exemple de la plaine de la Bassée (Seine en amont de Montereau) → zone forte anthropisée
- Apport du passé pour la restauration de la continuité écologique à l'échelle du bassin versant

Approche : Couplage terrain (sédimentologie), laboratoire (géochimie isotopique) et modélisation numérique





Changement climatique : atténuation et adaptation

Si la transition implique des changements motivés par la volonté de limiter le réchauffement climatique (atténuation des perturbations anthropiques), les sociétés sont également placées devant la nécessité de s'adapter aux effets indésirables du changement climatique sur les activités humaines. Pour répondre à ces défis et faire face notamment aux événements extrêmes, d'importants efforts s'imposent, en termes d'innovation et de transferts technologiques, en particulier vers les pays du Sud.

Face à ces enjeux complexes et sources d'inconnu, la nécessaire prise en compte de l'humain exige de croiser le point de vue de l'ingénieur avec ceux de la sociologie et des sciences cognitives. Ces approches apportent une meilleure prise en compte des modes de vie, des jeux d'acteurs et de l'impact des politiques publiques (incitations, tarifs d'achat, utilisation des normes et des labels), autant de points clés pour aborder la question de la mise en œuvre de la transition.

CERNA

Recherches sur la mesure de l'innovation et de la diffusion internationale des technologies.

Analyse des dynamiques industrielles, en particulier dans le domaine de l'innovation ouverte, des technologies bas-carbone, grâce à l'analyse économétrique des données et la cartographie des technologies.

Évaluation de l'impact des politiques publiques (tarifs de rachat, incitations, etc.).

Étude de l'effet du réchauffement sur les investissements dans les logements (comportement des ménages dans l'investissement, évaluation du coût de ces adaptations).

Construction d'un modèle du marché électrique.

CSI

Travaux sur la labellisation et la mesure de la performance énergétique dans les politiques de la construction durable. Voir chapitre Vers une économie plus vertueuse.

CGS

Diverses études apportant méthodes et outils théoriques au domaine de la gestion dans l'inconnu, production de méthodes d'évaluation et d'approches méthodologiques de prospective, fabrique et cartographie de l'imaginable et des imaginaires collectifs.

Évaluation du rôle des politiques publiques, en particulier des certificats d'économie d'énergie (CEE), par des méthodes qui ont été adoptées par l'ADEME et France Stratégie.

O.I.E.

Si l'intégration d'une part croissante d'énergies renouvelables dans le mix énergétique est largement acceptée comme une mesure d'atténuation du changement climatique, la question de l'effet du changement climatique sur les profils de production de ces sources d'énergies - et donc sur l'approvisionnement énergétique de demain - reste posée. Afin d'explorer les bouquets énergétiques futurs tout en répondant à cette question, des modèles de conversion photovoltaïques et éoliens ont été couplés à des données de projection climatiques et analysés dans différents projets de recherche, notamment en coopération avec le CMA.

CMA

Optimisation prospective d'un mix électrique sous contrainte de variabilité climatique et analyse de l'influence de variables climatiques sur le productible des différentes filières renouvelables (modélisation et prévision par machine learning).

- En particulier, le projet de recherche Clim2Power, en collaboration avec O.I.E. , visait à développer un service climatique accessible en ligne capable d'intégrer des prévisions météorologiques saisonnières dans différentes prises de décision au sein du secteur électrique de l'Union européenne. Ses résultats pourront bénéficier aux producteurs d'électricité et aux sociétés commerciales, opérateurs et régulateurs du système électrique, aux consommateurs d'énergie ainsi qu'aux gestionnaires de l'eau.

CGS

Chaire Théorie de l'entreprise avec comme partenaires Artelia, BPI France, Le lab, Mirova, Nutriset, Préfon, Veolia et le Collège des Bernardins.

- Thèse sur un modèle alternatif à la taxe carbone pour concilier efficacité et justice écologiques.

Contribution à la redéfinition de la société en droit grâce au cadre des sociétés à mission, particulièrement adapté à la transition énergétique, car il permet à des entreprises de se fixer des engagements en matière sociale et environnementale.

- Projet « observatoire des sociétés à mission », qui étudie les effets concrets en termes de gouvernance et d'impact.

Thèse sur l'accompagnement des startups deeptech : comment soutenir le passage à l'échelle (scale up) d'une innovation pour déployer son potentiel d'impact.



Organisation et gouvernance

Dans le contexte de la transition, de nouvelles formes d'organisation apparaissent, notamment pour les marchés de l'énergie, dont certains vont adopter une dynamique temps réel. Une démarche participative est souvent nécessaire pour mobiliser les acteurs et imaginer des solutions correspondant à la recherche d'un intérêt commun. Pour les entreprises, l'un des enjeux est de convertir les outils de mesure normatifs en outils de gestion afin de passer de la comptabilité environnementale à la stratégie bas-carbone. De nouvelles approches méthodologiques doivent permettre de prendre la mesure de cet environnement en mutation.

CGS

La **théorie de la conception (C-K)** permet de construire l'ensemble des alternatives autour d'une question. La constitution de ce référentiel évite les fixations, ces biais cognitifs qui conduisent à privilégier certaines pistes en empêchant de considérer l'ensemble des alternatives. Ces approches sont appliquées par exemple lors de l'élaboration de politiques scientifiques ou pour des cas industriels. Une étude a ainsi montré que dans l'évaluation de projets de biomasse, l'attention avait tendance à se porter sur la transformation thermochimique de la matière tandis que les aspects transport-logistique étaient négligés.

Travaux sur l'Internet physique, nouveau paradigme de logistique visant à mutualiser les réseaux pour réduire l'empreinte environnementale.

- Thèse *Vers une logistique plus performante et résiliente par l'interconnexion des réseaux logistiques*.
- Participation au projet Alice, qui réunit 150 acteurs, et vise à décarboner le domaine de la logistique en s'attaquant à l'inefficience des organisations actuelles <https://www.etp-logistics.eu>

CSI

Étude de la production d'expertise climatique en particulier dans le cadre des procès climatiques.

Étude du rôle des certificats d'énergie ; de la labellisation dans le processus d'innovation.

Enjeux d'innovation et de démocratie dans les projets d'extraction des ressources minérales.

ISIGE

Recherches sur le modèle de transition « social-écologique » du bassin minier français à Loos-en-Gohelle, et sur la généralisation possible de l'utilisation du levier de la culture territoriale dans la conduite du changement.

CMA

Analyse prospective des politiques climatiques nationales et internationales

L'objet d'une thèse soutenue en 2019, (réalisée) en collaboration avec la DGEC, est d'explorer l'impact des politiques publiques sur les enjeux de décarbonation à une échelle nationale et d'évaluer la question de la transition énergétique. Cette déclinaison du modèle prospectif « France » a conduit à une contribution du CMA aux travaux de la Commission Quinet lancée en Septembre 2017. Cette Commission avait réuni plusieurs équipes de modélisation dans l'objectif de proposer une nouvelle évaluation de la valeur tutélaire du carbone ou valeur de l'action pour le climat, qui sert de guide pour les investissements publics en France afin d'atteindre un objectif de neutralité carbone en 2050.

ACCOMPAGNER LA MUTATION DE L'ÉNERGIE



L'abandon progressif, mais programmé, des hydrocarbures comme sources d'énergie est un tournant qui ouvre la voie à de multiples alternatives. Les énergies renouvelables, qui connaissent un essor fulgurant dans le monde, sont appelées à poursuivre leur croissance dans le mix énergétique. Avec le renforcement de l'électrification, l'un des défis est de stocker les excédents de kWh produits par les énergies renouvelables intermittentes. L'hydrogène est un vecteur énergétique qui pourrait assurer ce rôle. Ce qui est certain, c'est que ces évolutions ne se feront pas sans de nouveaux procédés et matériaux indispensables à la constitution de nouvelles filières, et sans une dynamique d'adaptation et de conversion de tous les secteurs économiques. Une révolution à laquelle Mines Paris contribue activement.

L'intégration des EnR

L'intégration des énergies renouvelables (EnR) dans les systèmes énergétiques pose la question de leur gestion prédictive, leur planification et leur optimisation, en particulier pour les systèmes multivecteurs (électricité, hydrogène). Ces questions sont au cœur des systèmes électriques intelligents (smartgrids), qui vont jouer un rôle structurant sur les territoires, à toutes les échelles.

La prévision repose sur des méthodes statistiques ou physiques avancées, qui tiennent compte des incertitudes inhérentes à la production renouvelable, mais également des différentes options de stockage, de la flexibilité de la demande et du contexte dérégulé des marchés de l'électricité. L'optimisation tient compte des caractéristiques physiques et socio-économiques d'un territoire, voire d'un quartier.

CMA

Systèmes et réseaux électriques intelligents (smart grids, smart cities, micro grids, systèmes hybrides...)

Menée dans le cadre du projet Meridia Smart Energy (MSE) de construction d'un éco-quartier à Nice, une thèse démarrée en 2019 porte sur le développement d'une solution d'optimisation multi-énergies dans un smart grid composé d'installations de production, de consommation et de stockage d'électricité, de chaud et de froid. Le pilotage se fait sur deux échelles temporelles à savoir un planning optimal effectué en J-1 (day-ahead) et un contrôle optimal pratiqué tout au long de la journée J (intraday) pour adapter la conduite.

PERSEE

Développement de méthodes et d'outils permettant l'intégration optimale des EnR, de la demande active, des véhicules électriques, du stockage distribué et d'autres options de flexibilité dans les systèmes énergétiques et sur les marchés de l'électricité :

- Développement de méthodes avancées de prévision de la production de centrales EnR (solaires, éoliennes, hydrauliques au fil de l'eau, ...), de la consommation électrique, de la capacité dynamique des lignes électriques (ou DLR pour Dynamic Line Rating) à différentes échelles spatio-temporelles et pour différentes applications.
- Modélisation de systèmes multi-énergies hybrides intégrant des EnR et du stockage.
- Étude des synergies entre vecteurs : systèmes intégrés multi-énergies (électricité / gaz / chaleur / mobilité, ...).
- Conception d'approches innovantes pour la gestion prédictive de différents types de systèmes et la fourniture de services systèmes (smart homes, centrales virtuelles, micro-réseaux, réseaux de distribution, smart-grids, ...).

Développement de méthodes pour accompagner les acteurs de la transition énergétique (gestionnaires des réseaux, collectivités locales, ...) dans leurs processus de décision et de planification (optimisation des investissements, élaboration de scénarios prospectifs, ...).

Exemples :

- Nouvelle génération de modèles prédictifs du productible renouvelable (projet Hzozo Smart4RES)
- Services systèmes ex-centrales PV virtuelles pour les marchés régionaux et européens (projets Eranet RESTABLE et REGIONs)
- Couplage d'unités hydroélectriques avec des systèmes de stockage d'énergie par batterie : réduction de l'usure et augmentation de la capacité de régulation (projet Hzozo XFLEX)
- Simulateur bottom-up de la consommation électrique (collaboration avec ENEDIS)
- Optimisation de l'emplacement des unités de stockage et des bornes de recharge pour l'intégration des véhicules électriques (projet Eranet EVA)

CSI

Travaux sur les politiques publiques pour la régulation des tarifs d'achat des énergies renouvelables

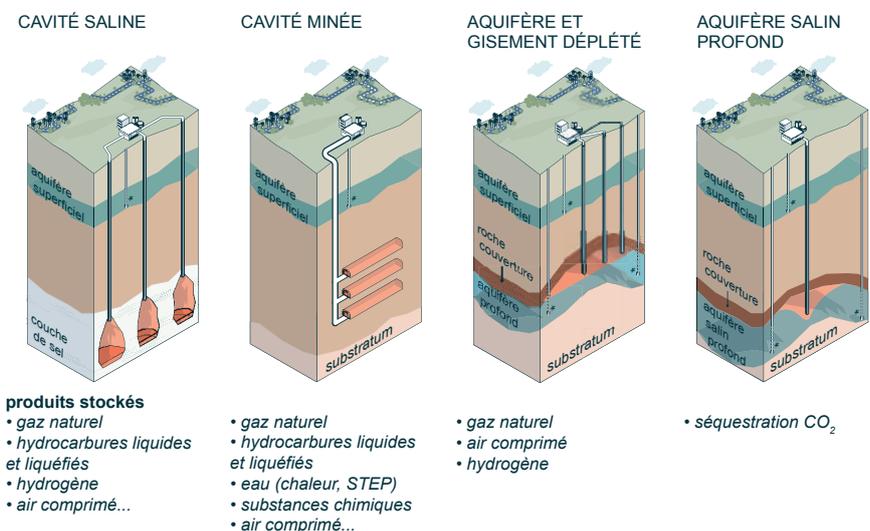
O.I.E.

Les travaux du centre sur l'estimation et la caractérisation de la ressource solaire à partir de moyens d'observation de la Terre (satellites, modèles numériques, mesures in-situ) favorisent l'intégration des EnR d'origine solaire sur tout leur cycle de vie : lors de la planification des installations, dans le suivi de leurs performances mais aussi pour la prévision de leur production électrique afin de favoriser leur intégration dans le réseau. Voir pages 28 et 29.

Le stockage d'énergie dans le sous-sol

Depuis longtemps, le sous-sol est utilisé pour extraire de l'énergie et la stocker notamment sous forme d'hydrocarbures liquides et gazeux. Dans un contexte de transition, le stockage de l'énergie est appelé à jouer un rôle croissant, grâce à différentes voies de conversion, telles que le *power to gas*, qui fait jouer à l'hydrogène un rôle de fluide de stockage de l'électricité. Le stockage en cavités salines est compatible avec les contraintes exigées par les scénarios de transition, en termes de dynamique d'injection-soutirage. Le principe pourrait s'appliquer aux fluides tels que l'hydrogène et l'air comprimé ou encore à l'oxygène, aux oxydes de carbone, qui, avec le méthane, entrent en jeu dans la technologie EMO¹ (électrolyse, méthanation, oxycombustion). La séquestration, qui permet d'éviter des émissions de CO₂ dans l'atmosphère, est également l'une des applications envisagées pour ces stockages dans des formations géologiques.

¹ EMO est un concept en boucle fermée de *power to gas to power* incluant un stockage permettant d'absorber les surplus de production électrique des EnR pour les restituer ultérieurement en utilisant un stockage transitoire en cavité saline de O₂, H₂, CO₂, CH₄.



Géosciences, CTP

Stockage massif en souterrain notamment en cavités salines :

- Caractérisation en laboratoire des roches hôtes, modélisation de l'intégrité du stockage (stabilité et étanchéité), étude expérimentale en laboratoire et modélisation de la réactivité du gaz stocké avec les matériaux du réservoir, impact environnemental...
- En particulier, étude des processus à l'oeuvre dans le stockage du CO₂ dans les cavités salines, notamment sa diffusion et son mélange avec l'eau et le sel (en tenant compte des impuretés potentiellement toxiques co-capturées avec le CO₂) Modélisation, réalisation d'essais sont mis en jeu dans de nombreuses thèses et projets ANR : GAZ ANNEXES, SIGARRR, FLUIDSTORY.
- Étude des diagrammes de phases : détermination des propriétés thermo-physiques des mélanges enrichis en CO₂ lors du stockage géologique de ce gaz (CTP).

CAS

Pour réduire les coûts de forage, l'un des postes les plus importants des projets de géothermie, l'un des enjeux est de limiter l'usure des trains de tige et des outils soumis à des vibrations importantes, afin d'augmenter les durées de vie. Des études sont menées afin de relier les mesures en temps réel à ce qui se passe à l'autre extrémité du train de tige : modélisation de la physique des vibrations mécaniques, assimilation de données, prise en compte des incertitudes, estimation, etc.

Géosciences – CMM et CAS et Drillscan

La rentabilité de la géothermie passe par une réduction drastique de ses coûts et plus particulièrement des coûts de forage qui restent le frein principal à son développement.

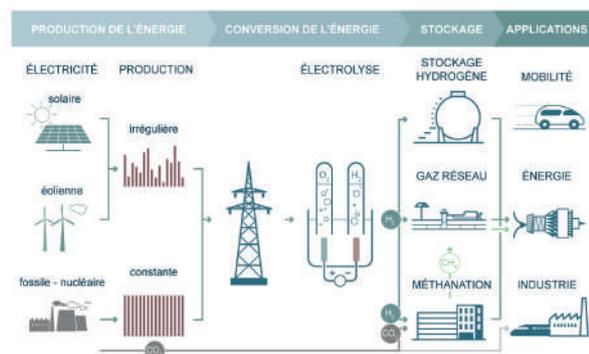
L'objectif d'une thèse à venir est de développer un algorithme d'apprentissage permettant de caractériser en temps réel le mode de fonctionnement d'un outil de forage et de détecter d'éventuels dysfonctionnements à partir de données de surface obtenues sur le site de forage. Un tel algorithme de suivi en temps réel pourrait permettre d'optimiser les paramètres de forage et de réduire en conséquence les coûts associés au forage.

La piste « hydrogène »

L'hydrogène est envisagé comme solution de stockage et de gestion des énergies renouvelables en vue de leur intégration dans des systèmes multi-énergies.

Toutefois, avant que cette filière n'atteigne sa maturité, bien des verrous technologiques devront être levés, aussi bien pour sa production, son transport, son stockage, que ses utilisations. Cela exige des efforts de recherche fondamentale et le développement de techniques et de procédés sûrs et efficaces, notamment au plan énergétique pour concevoir des infrastructures et des équipements adaptés.

11 des 18 centres de recherche de Mines Paris sont mobilisés au sein du groupe de travail H2MINES pour relever les défis de l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène. Parmi les principaux axes traités, citons par exemple la production propre ou renouvelable à partir d'eau ou de méthane, le stockage (sous pression, sur solides divisés ou géologique), la liquéfaction, la conversion dans les piles à combustible, l'utilisation pour la production de méthane, la réduction du CO₂ ou encore le stockage des énergies renouvelables et bien entendu, les défis mécaniques (notamment par rapport à la tenue des matériaux). Les aspects développement durable au sens large sont également considérés (ACV, risques, économie et société).



PERSEE

Depuis une trentaine d'années, les activités du centre sur les piles à combustible basse température (PEMFC), notamment pour la mobilité, visent à réduire les coûts et améliorer les performances, en proposant des concepts systémiques innovants et en développant de nouveaux matériaux de cœur de pile. Elles se sont rapidement diversifiées pour aborder entre autres la production propre d'hydrogène par électrolyse de l'eau ($H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$), photocatalyse ou craquage plasma du méthane avec co-production d'hydrogène et de noirs de carbone ($CH_4 \rightarrow 2 H_2 + C$).

- Coordination du groupe H2MINES (21 Centres de recherche de l'Institut Carnot M.I.N.E.S.), du projet fédérateur Carnot HyTREND (2020-2023, 13 Centres de recherche de l'IC M.I.N.E.S.) et du nouvel l'Enseignement Spécialisé « Filière Hydrogène Energie » du Cycle ingénieurs civils (9 Centres de recherche de l'IC M.I.N.E.S.).

CES

Procédés de production d'hydrogène par électrolyse.

Power to gas, recyclage du CO₂ et méthanation.

MAT

Caractérisation à différentes échelles de matériaux composites pour les applications à la mobilité, en particulier pour les réservoirs, nécessitant d'excellentes propriétés mécaniques et une masse volumique réduite.

Ingénierie des interfaces électrode/électrolyte au sein de dispositifs SOFC et SOEC pour améliorer leurs performances électrochimiques.

Optimisation de la microstructure d'électrodes composites pour les technologies SOFC et SOEC. Étude de l'utilisation d'installations de transport d'hydrocarbures des années 1960 pour le transport d'hydrogène.

Membrane duale de reformage et filtration pour la production d'hydrogène par réaction de craquage.

O.I.E. , CSI, CMA, CERNA, ISIGE, CRC

Analyses de cycle de vie, socio-technique (controverses), prospective, économique, territoriale, risques, etc.

L'évolution de la filière hydrogène vers une production décarbonée fait partie des priorités de la stratégie nationale française. Cette évolution passe par une substitution progressive du processus de vaporeformage de gaz naturel, majoritaire aujourd'hui, vers l'électrolyse d'eau reposant sur des sources de production d'électricité renouvelables. En plus de la potentielle réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'autres impacts sur l'environnement, tels que l'utilisation d'eau ou les émissions de substances eutrophisantes sont analysés par le centre O.I.E à travers la méthode d'ACV dans le cadre du projet HyTrend.

Géosciences

Travaux sur le stockage de l'hydrogène en phase gazeuse, en cavité saline ou en cavité minée revêtue, et en phase liquide, en réservoir enterré ou en cavité minée revêtue. L'une des questions les plus importantes que pose le stockage de l'hydrogène gazeux est le phénomène de perméation lié à la petite taille de la molécule d'hydrogène et à sa mobilité. Pour le stockage liquide, la température basse utilisée impose la mise en œuvre d'un revêtement spécifique permettant d'assurer à la fois l'isolation, l'étanchéité et la stabilité du stockage.

CTP

Recherche fondamentale sur les propriétés des gaz, caractérisation des propriétés thermophysiques, modélisation thermodynamique, détermination des équilibres de phase. Ces recherches interviennent notamment pour la liquéfaction de l'hydrogène en vue de son transport ou pour la détermination de la solubilité de l'hydrogène dans la saumure, une question soulevée par le projet de stocker de l'hydrogène dans des cavités salines.

ISIGE

Dans le cadre d'un projet à financement Carnot, analyse des stratégies de développement territorial intégrant l'hydrogène et de son insertion dans le paysage sociopolitique et sociotechnique local : appropriation par les collectivités des évaluations de la durabilité des technologies, communication des porteurs de projets, usages, jeux d'acteurs, interaction avec d'autres politiques sectorielles.

CMM

Réalisation de plusieurs études s'appuyant sur l'expertise du centre dans la modélisation et l'optimisation multi-fonctionnelle de piles à combustibles à oxyde solide, en partenariat notamment avec le DLR en Allemagne, le Centre des Matériaux de Mines Paris et l'ISTEC en Italie, dans le cadre du projet européen Evolve ou encore avec l'université (Ulm) en Allemagne.

L'AVION À HYDROGÈNE

L'hydrogène est une piste de plus en plus envisagée pour décarboner l'aviation. Cela exige une reconfiguration des avions par le biais de nouveaux concepts incluant diverses voies technologiques et configurations aérodynamiques.

Dans l'ambitieux problème de la conception d'un avion à zéro émission, le stockage de l'hydrogène comme "carburant" représente l'un des plus gros défis.

CEMEF

Collaboration avec AIRBUS pour concevoir, modéliser et réaliser les réservoirs de stockage d'hydrogène.

Le savoir faire du CEMEF dans le domaine de la mise en forme par procédés incrémentaux et de la simulation numérique en fait un acteur incontournable de l'aventure technologique de la conception d'avions à émission zéro.

1^{ÈRE} PARTICIPATION AU MONACO ENERGY BOAT CHALLENGE : mise au point d'un bateau à propulsion électrique alimenté par une pile à combustible, une réalisation concrète multi-Centres.

En 2021, le CRC, le CEMEF et PERSEE ont uni leurs efforts pour présenter sur la ligne de départ de la classe Energy du MEBC un bateau sous double pavillon Ecole et Fondation Mines Paris. Les équipes se sont concentrées sur la conception d'une nouvelle hélice en impression 3D avec le support de La Ferme 3D, la structure et l'intégration du système hydrogène développé spécifiquement pour la compétition par SYMBIO. Pour sa toute première participation CALOU 1 a décroché une honorable 4^e place (sur 10 inscrits) après les épreuves d'endurance, slalom et championship.



CALOU 1 sur la ligne de départ Championship race,
Yacht Club de Monaco 10 juillet 2021

Gaz en transition

Dans de nombreux pays, le gaz naturel va se substituer au charbon, apportant ainsi une réduction de 30 % des émissions de dioxyde de carbone. Ce vecteur énergétique connaît lui-même une mutation, car il vise un horizon décarboné en 2050 dans l'Union européenne. Le gaz peut favoriser l'essor de filières décarbonées ou bas-carbone telles que le biogaz et l'hydrogène produit par électrolyse, lesquels pourront bénéficier de ses infrastructures de transport et de distribution, avant de le remplacer. Synthétisé à partir de l'hydrogène, le méthane peut également servir de moyen de stockage de l'électricité produite en excédent à partir des EnR.

CERNA

Chaire Economics of the Natural Gas (avec l'université Paris Dauphine PSL, l'IFP School et Toulouse School of Economics) et le soutien d'EDF-Edison, GRTGaz et TOTAL Energies.

CES

MS GAZ - Ingénierie et gestion du gaz.

Thèse avec GrdF sur le potentiel du réseau gaz en support du réseau électrique.

Recherches sur les procédés de liquéfaction du biogaz.

MAT

Étude des endommagements et de la rupture de matériaux métalliques, en particulier les canalisations des réseaux de transport de gaz – évaluation de la présence de fissures grâce à des micro-éprouvettes compatibles avec des essais en charge.

CTP

Caractérisation des liquides cryogéniques : la maîtrise des diagrammes de phases incluant les phases solides lors de la liquéfaction du méthane pour un dimensionnement optimisé des procédés. Deux projets industriels communs sur la production de gaz naturel liquéfié sont en cours.

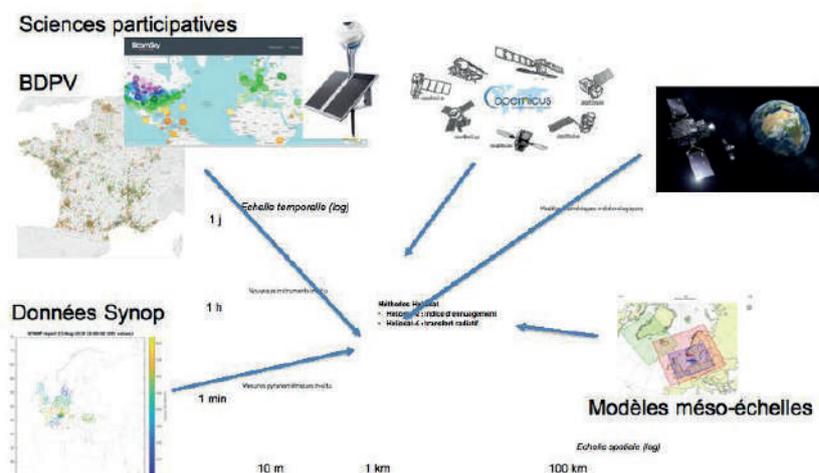
Détermination des diagrammes de phases lors du captage du CO₂.

O.I.E.

Les microalgues sont une source émergente de bioénergie grâce à leur capacité de conversion d'énergie solaire utilisant du dioxyde de carbone et de l'eau riche en nutriments, en matière organique et oxygène et grâce à des avantages comparés aux sources de biomasse terrestres. Dans le cadre du projet européen PRODIGIO, O.I.E. vise à développer un cadre méthodologique pour l'évaluation holistique de la durabilité et la comparaison des potentiels impacts environnementaux, économiques et sociaux de la production d'énergie à partir de biogaz issu d'algues.

Les données au service du solaire

Le solaire est la plus importante source d'énergie sur Terre. Cependant, pour qu'elle puisse contribuer pleinement à la transition énergétique, des recherches sont nécessaires, en particulier pour améliorer son efficacité, réduire ses coûts, limiter les impacts de sa variabilité ainsi que sa vulnérabilité aux risques naturels, météorologiques et climatiques et pour l'intégrer à grande échelle dans le mix énergétique. La caractérisation et la prévision de la ressource solaire, à partir des données hétérogènes entachées d'incertitudes, issues notamment des satellites géostationnaires (projet européen Copernicus) et des pyranomètres, jouent un rôle clé dans le développement de cette énergie renouvelable.



CEMEF

Recherches sur la performance et la durée de vie des modules photovoltaïques.

Simulation à grande échelle aérodynamique et structure pour la durabilité de centrales photovoltaïques.

CSI

Étude du rôle des tarifs d'achat dans le développement du solaire photovoltaïque.

O.I.E.

La **chaire SciDoSol** (Les Sciences de la Donnée appliquées à l'énergie Solaire pour la transition énergétique) de l'OIE cherche à répondre aux besoins des industriels, gestionnaires de réseau et autres parties prenante dans la valorisation de l'énergie solaire. Pour cela, elle s'appuie sur trois piliers : la recherche, le transfert de connaissances et la formation.

Recherches visant à caractériser et prévoir la ressource solaire à différentes échelles temporelles (de l'ordre de la minute à l'échelle climatologique) et spatiales (de l'ordre du mètre à l'échelle mondiale).

Utilisation des sciences de la donnée, et en particulier de l'apprentissage statistique pour obtenir une caractérisation et une prévision du rayonnement solaire à haute résolution (spatiale, temporelle et angulaire) à partir de la fusion de modèles météorologiques, d'images satellites, de réseaux de capteurs pyranométriques et de caméras hémisphériques (fish-eye) in-situ.

Valorisation des bases de données au travers du service gratuit Atmosphere Monitoring de Copernicus et via Transvalor auprès de milliers d'entreprises (www.soda-pro.com).

Horizon 2050 avec l'ADEME : Évaluation environnementale multicritère de scénarios à l'horizon 2050 dans un contexte insulaire.

(<https://www.minesparis.psl.eu/Actualites/Quelle-empreinte-environnementale-pour-notre-avenir-energetique/4863>).

Les approches du type ACV sont largement acceptées et appliquées pour estimer les impacts environnementaux des filières énergétiques individuellement et du mix énergétique dans son ensemble. Néanmoins, la plupart des études reposent sur de nombreuses hypothèses, affectées par la grande variabilité des technologies considérées, et les incertitudes élevées liées à la modélisation impliquent une variance des résultats d'ACV pour des systèmes similaires. Le projet INCER-ACV (2017-2020), financé par l'ADEME, a permis la formalisation d'un protocole standard pour analyser les effets de cette variabilité et ces incertitudes ainsi qu'un outil opérationnel, sous la forme d'une librairie en Python pour l'implémentation de ce protocole, et une plateforme en ligne.

Coopération avec le gestionnaire de réseau de transport RTE pour l'amélioration de la prise en compte du photovoltaïque diffus dans le processus d'équilibre offre-demande grâce à l'exploitation de différentes sources de données. En effet, les installations diffuses ne disposent pas de relevé de production et l'estimation de leur productible est marquée par une grande incertitude. Le travail conduit avec RTE vise à mieux caractériser ces installations et, à terme, anticiper de façon plus précise leur production (webservice-energy.org/incer-acv/app/). Les méthodes et les outils développés au sein du projet peuvent être appliqués aux filières énergétiques renouvelables ainsi qu'à d'autres secteurs d'activité.

CGS

Thèse avec l'O.I.E. sur le co-design de services à partir des données de l'observation de la Terre pour faire face aux défis environnementaux.

DÉVELOPPEMENT D'UN CADASTRE DE CARACTÉRISATION DES TOITS VIS-À-VIS DU PHOTOVOLTAÏQUE DANS LA MÉTROPOLE DE NANTES

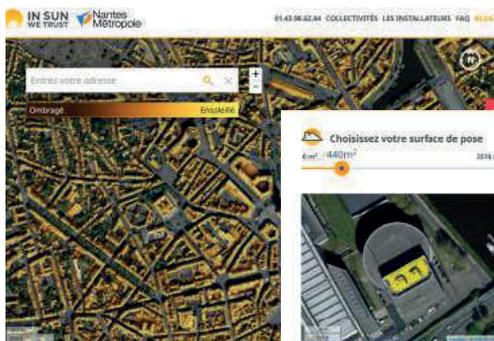
Un partenariat entre la start-up *In Sun We Trust*, l'O.I.E., Transvalor, l'IGN et la métropole de Nantes a conduit à la mise en place de la plateforme nantes-metropole.insunwetrust.solar, qui a pour objectif d'encourager les acteurs locaux à installer des panneaux solaires en milieu urbain en leur indiquant les toits les plus favorables à une installation photovoltaïque (localisation, surface, ensoleillement, orientation, calcul des gains énergétiques et financiers sur 20 ans), puis en les mettant en relation avec des entrepreneurs de ce domaine.

Ces travaux sur la variabilité urbaine du rayonnement solaire et l'autoconsommation se prolongent dans le cadre du projet européen e-shape

<https://www.e-shape.eu/index.php/showcases/pilot3-2-high-photovoltaic-penetration-at-urban-scale>

La caractérisation de la ressource solaire *Cadastre solaire à très haute résolution*

- Descente en échelle spatiale des estimations par satellite
Cadastre Solaire métrique avec *In Sun We Trust*, IGN, Transvalor Innovation



FOCUS MATÉRIAUX

Les propriétés des matériaux influent directement sur les performances énergétiques des équipements tels que les moteurs. Par exemple, un alliage métallique supportant des températures élevées va permettre d'améliorer le rendement d'un réacteur d'avion. La décarbonation des différents secteurs industriels impose ainsi de revoir les bases de conception des systèmes, ce qui implique de nouveaux cahiers des charges pour les matériaux, avec des conséquences sur le dimensionnement, la qualification, la recyclabilité, etc. La science des matériaux contribue à ces objectifs par la caractérisation expérimentale, la modélisation et la simulation numériques.

Le nucléaire durable

Le nucléaire fournit en France une énergie électrique largement décarbonée et en quantité suffisante pour rendre possible la transition vers une contribution plus intensive des énergies renouvelables. L'un des enjeux technico-économiques est d'augmenter la durée de vie des centrales nucléaires et, au-delà, d'assurer la durabilité de toute la filière électronucléaire, en particulier en renforçant sa sûreté.

MAT

Le Centre des Matériaux s'implique dans la conception de la prochaine génération de réacteurs nucléaires et effectue des recherches sur les matériaux employés dans les centrales, notamment au travers de thèses avec le CEA, EDF et FRAMATOME y compris dans le domaine de la fabrication additive. Cette technique s'avère en effet très utile pour le remplacement de certaines pièces dont la chaîne d'approvisionnement a été rompue.

Matériaux pour la transition électrique

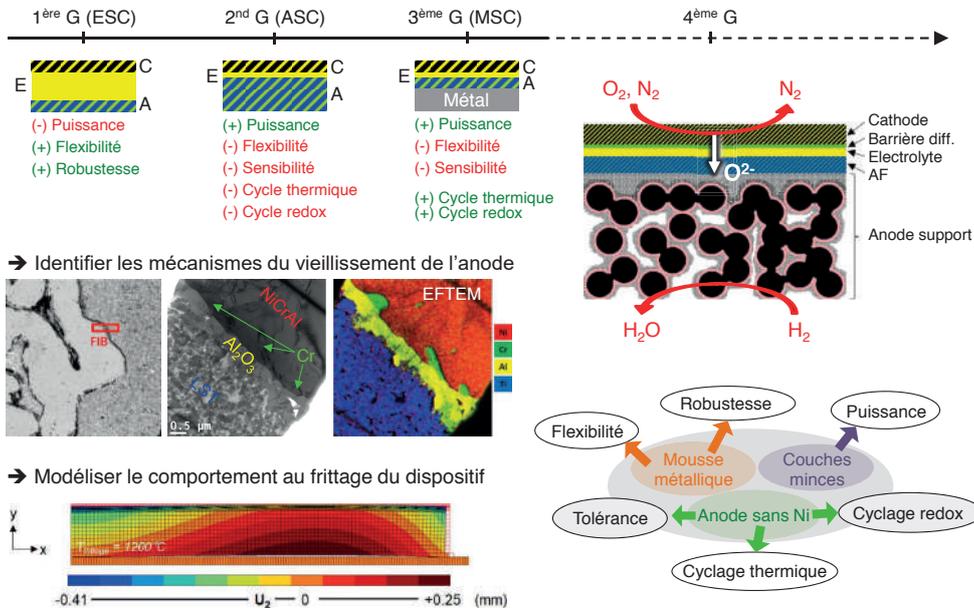
CEMEF

Chaire industrielle ANR - Safran TOPAZE en coopération avec l'institut Pprime : recherches sur l'amélioration des performances des matériaux métalliques, en particulier sur la tenue en usage de ces matériaux dans des conditions extrêmes, par exemple de gradient thermique ou de vibrations, comme dans l'aéronautique. Participant à l'optimisation du rendement des moteurs d'avion et à la réduction de leur impact sur l'environnement, les caractéristiques des matériaux sont un enjeu stratégique pour Safran, et pour l'ensemble du secteur du transport aérien.

Chaire industrielle ANR INFINITY cofinancée par ArcelorMittal, Aubert & Duval, Cefival, CMI, Faurecia, Framatome, Industeel, Lisi Aerospace, Montupet, Safran, SC-Consultants et TSV : optimisation des bacs de trempe et des fours de traitement thermique utilisés dans différents domaines, en particulier dans le nucléaire, l'automobile et l'aéronautique.

Conception spécifique d'électrodes pour piles à combustible à oxyde solide (SOFC de continuité ou de rupture), implantation d'une méso (micro) -géométrie aux interfaces électrode / électrolyte d'une cellule d'électrolyse pour améliorer les performances électrochimiques.

Dispositif SOFC de 4^{ème} génération

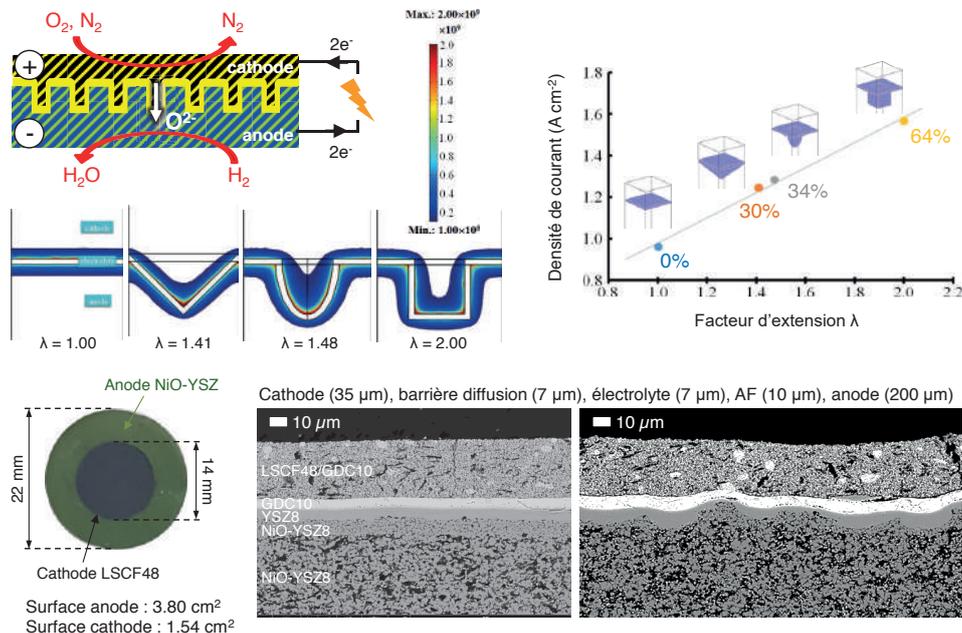


Opération de flexibilité des systèmes

4

Développement d'une anode innovante pour dispositif SOFC de continuité

SOFC : ingénierie des interfaces



Opération de flexibilité des systèmes

3

FAVORISER UNE ÉCONOMIE PLUS VERTUEUSE



Outre l'évolution du mix énergétique, la décarbonation de l'économie passe également par une meilleure gestion de l'énergie et des ressources, à toutes les échelles : efficacité énergétique, économie circulaire, flexibilité des systèmes énergétiques, etc. Y contribuent également indirectement le recyclage, les matériaux biosourcés ou encore l'adoption de modes de vie plus sobres au plan énergétique. L'évaluation de ces différentes contributions n'échappe pas à une indispensable évaluation par des outils de mesure telle l'analyse de cycle de vie.

L'économie circulaire pour l'énergie

L'idée de l'économie circulaire, c'est de faire des déchets des uns les matières premières des autres. Autrement dit de mutualiser l'énergie et les ressources et de valoriser les déchets énergétiques et matière, dans une perspective d'optimisation.

Mise en œuvre dans les **écoparcs industriels**, cette pratique pourrait influencer fortement sur la structuration des réseaux et l'aménagement du territoire. Elle s'appuie sur divers procédés de conversion et sur des leviers d'optimisation tels que la simulation de la demande et l'utilisation de flexibilités permettant de piloter les consommations. Ainsi, à l'échelle d'un quartier, la prise en compte des modes de vie et des usages et leur intégration est susceptible d'apporter des économies en limitant les pointes de consommation grâce au stockage ou à des mesures d'effacement.

CES

- Développement d'outils de simulation des réseaux de chaleur et de froid à l'échelle du territoire.
- Étude de la flexibilité (EDF), en particulier étude de la contribution des chauffe-eau électriques.
- Méthodologies de conception de systèmes relevant de l'économie circulaire.
- Évaluation technico-économique et aide à la décision : choix des fluides et procédés.

CGS

- La **chaire MINES Urbaines**, un partenariat entre Eco-systèmes, ParisTech, Arts et Métiers et Chimie ParisTech, s'intéresse aux Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE), sources de matériaux plastiques et de métaux rares stratégiques, dont l'exploitation est essentielle au développement d'une économie circulaire respectueuse de l'environnement et des citoyens.
- Thèse CIFRE sur les réseaux de chaleur durable. Etude du référentiel de comptabilisation de la biomasse, qui varie d'un pays à l'autre.

PERSEE

- Scénarios de rénovation des bâtiments à l'échelle d'un territoire (collaboration avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

CES

- Perfectionnement de l'ACV des ensembles bâtis en modélisant le mix énergétique et son évolution dans le temps en fonction de scénarios prospectifs de transition énergétique, en lien avec le CMA.
- Le logiciel **Pleiades** (www.izuba.fr/logiciels/) est une solution pour l'écoconception des bâtiments à hautes performances énergétique et environnementale, développé avec le soutien du lab recherche environnement. Utilisé par 2 500 bureaux d'études et cabinets d'architectes, ce modèle de simulation thermique dynamique des bâtiments anticipe la consommation énergétique et les risques d'inconfort en toutes saisons, dès la phase de conception. Grâce au module Amapola, ce logiciel permet d'identifier les solutions les moins coûteuses, d'anticiper les usages et d'optimiser la fiabilité des prévisions. Il est ainsi possible d'évaluer la consommation énergétique dans le cadre de la garantie de performance énergétique avec un risque de dépassement de moins de 5 %. En s'appuyant sur les données des capteurs connectés, le logiciel tient compte des occupants et de leur comportement.

DU BÂTIMENT AU QUARTIER, TRANSITION À TOUS LES ÉTAGES

Le secteur du bâtiment représente à lui seul près de la moitié de la consommation totale d'énergie en France, et les deux tiers de la consommation d'électricité.

Avec son importante contribution aux émissions de gaz à effet de serre, le secteur du bâtiment est un levier d'action prioritaire, en particulier en matière de réglementation. L'amélioration de ses performances énergétiques et environnementales est un enjeu crucial, qui passe par la rénovation et l'application d'innovations.

Parmi les pistes d'action : l'adaptation à ce secteur des méthodes de mesure telles que l'analyse du cycle de vie (ACV), l'écoconception et notamment la conception bioclimatique, qui vise à mieux adapter les constructions au climat afin de réduire les consommations énergétiques tout en assurant le confort hygrothermique des occupants en toute saison.

CMA

Dans une analyse du cycle de vie «classique», des coefficients fixes sont utilisés pour évaluer l'impact de la consommation électrique pendant toute la durée du projet alors même que le système électrique va évoluer. Pour y remédier, le projet ACV énergies a pour objet de développer une méthodologie permettant d'intégrer ces développements dans les outils utilisés en pratique par les maîtres d'ouvrages. Plus spécifiquement, une évaluation prospective de l'ACV des systèmes électriques et gaziers est menée par le CMA dans le cadre de la future réglementation thermique à destination des maîtres d'ouvrage.

Utilisation de Nudges pour l'efficacité énergétique

Thèse sur l'utilisation des innovations apportées par les objets connectés (IoT) et sur l'intégration d'une approche comportementale dans le but de maîtriser les consommations énergétiques dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. À travers une analyse des données de consommation, cette approche permet d'étudier l'impact des «Nudges» (incitations) sur le comportement des occupants et sur les réductions possibles des consommations énergétiques à court et long terme. Ceci permettra d'établir par la suite un programme de pilotage énergétique fondé sur l'implication dynamique des occupants.

La Chaire Le lab recherche environnement

La Chaire Le lab recherche environnement, partenariat entre VINCI et trois écoles d'ingénieurs de ParisTech sous l'égide de la Fondation ParisTech, vise à réduire l'impact environnemental des bâtiments, des quartiers et des infrastructures.



CES / CAS

Pilotage énergétique des bâtiments

- Développement d'algorithmes d'optimisation énergétique des bâtiments avec utilisation d'un stock saisonnier d'énergie (utilisation d'une sonde géothermique, pilotée par une pompe) dans une optique de confort thermique. L'objectif est de piloter au moindre coût la thermique d'un bâtiment, sous des contraintes de confort pour les occupants (température de l'air à l'intérieur du bâtiment).
- Collaboration sur le contrôle-commande ; pompes à chaleur, systèmes thermodynamiques, bioclimatiques (puits climatiques).

Formation

Pilotage de la filière ISUPFERE, d'ingénieur en alternance.

CERNA

Étude de l'effet du réchauffement sur les investissements dans les logements (comportement des ménages dans l'investissement, évaluation du coût de ces adaptations).

CSI

L'objectif du projet de recherche socio-économique PREMOCLASSE est d'analyser les différents rôles du diagnostic de performance énergétique (DPE) dans le secteur de la rénovation. Mené en partenariat par EDF R&D, le CSI et le CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement) et co-financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) pour une durée de quatre ans (2020-2023), il cherche en particulier à comprendre la relation entre la mesure de la performance énergétique par le DPE, et la mise en œuvre de travaux spécifiques de rénovation, qui ne sont que partiellement liés actuellement.

Matériaux biosourcés et recyclage

Présents aussi bien dans les produits industriels que dans les produits de consommation courante, du fait de leurs propriétés, au premier rang desquelles une faible densité, les polymères contribuent à alléger les structures et donc à diminuer leur empreinte carbonée. Objectif fixé par la réglementation, leur recyclabilité, qui soulève de nombreuses questions techniques et organisationnelles, doit être abordée dès la conception du matériau, comme une performance cible.

En se substituant aux produits issus du pétrole, les matériaux biosourcés représentent une piste intéressante. Cependant, la question de la disponibilité du matériau et d'un potentiel appauvrissement des ressources se pose.

ISIGE

Activités de recherche-action en partenariat avec Ecosystem sur la mise en place de filières de recyclage de plastiques, l'étude des enjeux sanitaires et environnementaux associés et des questions techniques et organisationnelles liées à la mise en œuvre d'une politique de réparabilité.

CEMEF

Vers des emballages alimentaires polymère écoconçus :

De la bouteille en PEF 100% biosourcé au pot de yaourt PET 100% recyclé

Face aux enjeux environnementaux actuels, le domaine de l'emballage alimentaire fait l'objet de profondes remises en question, impliquant des matériaux polymères écoconçus, facilement recyclables et possiblement issus de la biomasse. Les objectifs des travaux de recherche en cours sont de comprendre les comportements physico-chimique et mécanique de ces nouveaux matériaux : mélanges hybrides recyclés ou encore biopolymères émergents. Ces polymères de demain doivent présenter une bonne aptitude à être grandement déformés et à développer des microstructures pertinentes, en termes de propriétés thermiques, mécaniques et barrières, comme l'impose le cahier des charges de l'emballage alimentaire d'aujourd'hui.



Les deux projets de recherche financés par l'ANR à partir de fin 2021, NIAS et e-DIP, permettront au CEMEF d'étudier l'impact des additifs contenus dans les matières plastiques dans les écosystèmes terrestres, d'évaluer la sécurité du recyclage des plastiques ainsi que les moyens de diminuer la présence et les dangers de ces additifs ajoutés ou hérités.

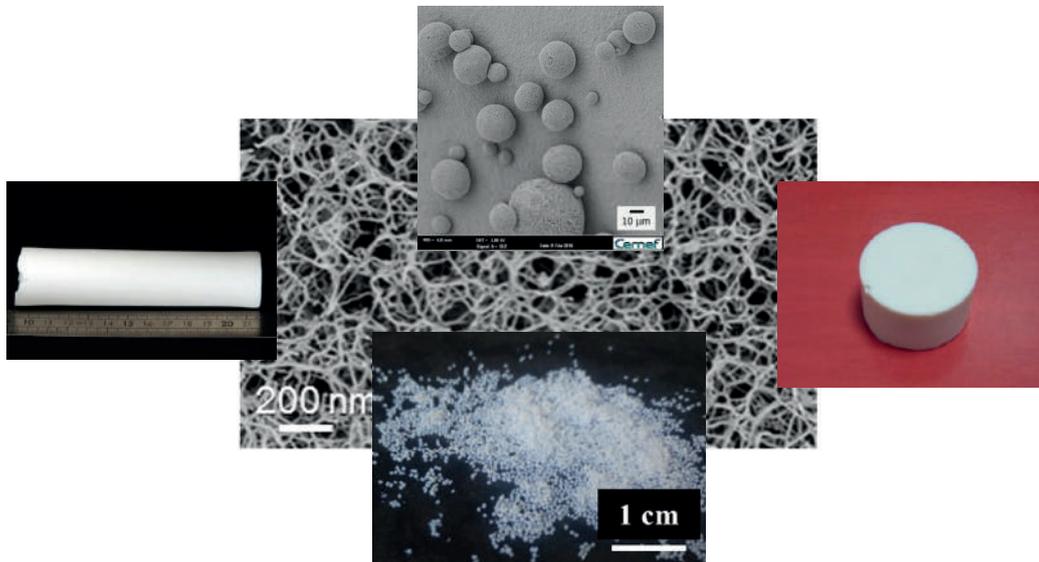
« **Biomasse pour le Futur** » est un projet de recherche financé dans le cadre des Investissements d'Avenir dont l'objectif est de substituer aux matériaux issus du pétrole de la biomasse renouvelable produite en France, en formulant des composites polymères et des bétons incorporant des végétaux, en fournissant aux équipes de généticiens, d'agronomes et de biologistes les données leur permettant de développer de nouvelles générations de plantes mieux adaptées à des usages matériaux, tout en améliorant leurs performances agronomiques et environnementales.



Exemples de déchets de textile et billes d'aérogel de cellulose à base de ces textiles

MAT, CEMEF, CSI

La recyclabilité des polymères fait l'objet d'une action Carnot, visant à accompagner le développement de filières de la plasturgie des bouteilles plastiques, la filière textile et celle des matériaux biosourcés. Le CEMEF développe un nouveau procédé de recyclage textile en réutilisant la part cellulosique sous forme d'aérogels, matériaux à haute valeur ajoutée, pour des applications de libération contrôlée de principes actifs.



ISIGE :

Dans le cadre du projet ARMINES Carnot Recyclabilité-polymères, étude pour une filière émergente telle que le textile et pour la filière installée des emballages de la performance de pratiques de recyclage de matières plastiques : performance environnementale, y compris les effets rebond, pistes de propositions pour développer des solutions de durabilité forte et enfin exploration des impacts sociaux et des leviers organisationnels, institutionnels et sociopolitiques pour la mise en place de filières.

LE MISCANTHUS

Le miscanthus, une plante de la famille des graminées, possède d'intéressantes propriétés mécaniques et environnementales ; il peut par exemple être incorporé sous forme de fibres dans des matériaux comme le béton ou des polymères. Son ajout comme renfort à des polymères confère à ces biocomposites d'excellentes propriétés mécaniques lui permettant de trouver des applications dans de nombreux secteurs tels que l'industrie automobile.

Nouveaux modes de vie – nouvelles dynamiques

De l'agriculture ouverte au *low tech*, en passant par la distribution en vrac, de nouveaux modes de vie et de nouveaux modèles se font jour. La sobriété voire la frugalité s'affirment comme des leviers de la transition. Ces valeurs nourrissent des démarches responsables, qui à partir d'initiatives individuelles deviennent des dynamiques locales.

Par ailleurs, les comportements relatifs, par exemple, aux modes de consommation, aux rapports au temps et à l'espace, aux types de loisirs, aux habitudes de mobilité ou encore aux modalités de cohabitation sont des déterminants essentiels de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, qui doivent être appréhendés dans les modèles globaux.

CMA

Prise en compte des modes de vie, des habitudes des usagers et de l'acceptabilité dans les modèles d'optimisation et de prospective énergétique

- Une thèse soutenue en 2017 a eu pour objectif d'appréhender les modes de vie et leur évolution pour intégrer ces éléments dans les exercices de prospective énergie-climat, qui en sont souvent pauvres, et en particulier pour éclairer la réalité socioéconomique d'hypothèses de rupture. Les développements méthodologiques proposés ont permis d'enrichir les représentations des mutations socioéconomiques et d'exploiter des hypothèses de transition rarement explorées, faute d'outils ou de méthodes adaptés.
- Une thèse soutenue en 2015 a porté sur la modélisation prospective et l'étude macroéconomique de scénarios sociétaux de décroissance. Ces scénarios prospectifs ont été élaborés à partir d'une série d'entretiens, grâce à une approche innovante et originale fondée sur un modèle entrées-sorties dédié permettant d'explorer sur le long terme les implications possibles, en termes d'emploi, de finances publiques, de consommation d'énergie, d'émissions de polluants atmosphériques et de production de déchets, de ces différents scénarios.

CSI

Étude des méthodologies visant à rendre les technologies faciles à reproduire dans le domaine de l'agriculture et de l'agroécologie.

Thèse en cours s'attachant à caractériser le processus de développement socio-économique des marchés du vrac pour les produits de grande consommation.

Thèse soutenue en 2020 étudiant les logiques politiques des communautés en habitat participatif.

ISIGE

Expertise au profit de territoires suburbains et ruraux en matière de diagnostic territorial visant à identifier et partager le potentiel d'actions en termes d'alimentation, de capacité biomasse, de précarité énergétique et de mise en place de l'économie circulaire.

Déclinaisons multi-échelles des politiques de durabilité (voirie, biomasse, canalisations, réservoirs, villes...).

En s'appuyant sur plusieurs cas tels que Paris Toulouse, Alençon et Saint-Brieuc, l'étude *Métriques et Pratiques de la Ville Propre* analyse les différentes stratégies de propreté urbaine, notamment la persistance des logiques hygiénistes. L'un des objectifs est la construction d'outils d'aide à la décision rendant plus sobres en ressources matérielles et énergétiques les pratiques dans ce domaine et améliorant la connaissance locale des socio-écosystèmes locaux.

Les Mastères Spécialisés de l'ISIGE permettent de développer les compétences indispensables dans le monde des entreprises pour mettre en place de manière durable la transition environnementale, au niveau international (MS EnvIM) ou en France (MS EEDD, options IGE et RSEDD) pour des étudiants respectivement récemment diplômés ou en formation continue.

Le virtuel pour décarboner

En se substituant partiellement aux rencontres physiques, la réalité virtuelle et ses déclinaisons peuvent contribuer à la décarbonation de certains secteurs. Alors qu'elles ont trouvé leur place dans les univers industriels, notamment au service de la formation, de la conduite et la maintenance des installations, elles pourraient trouver des applications de plus en plus nombreuses dans les domaines de la culture et du tourisme.

FOCUS : VERS UN NUMERIQUE VERT ?

Le numérique est souvent présenté comme un levier de transformation indispensable pour réussir la transition vers une société décarbonée. Algorithmes et systèmes d'information fournissent en effet de précieux outils de conception, de simulation et d'optimisation, appelés à accroître le rôle qu'ils jouent dans l'aide à la décision, l'exploitation et la flexibilité des systèmes techniques. Toutefois, de plus en plus énergivore, le numérique représente une externalité dont les impacts doivent être évalués attentivement, afin de limiter les risques de rebond de la consommation.

CAOR :

Au CAOR, la réalité virtuelle fait partie des briques technologiques liées à l'automatisation des systèmes. Elle intervient également en tant que moyen d'étude.



En simulant en réalité virtuelle les opérations en usine, il est possible d'optimiser le poste de travail, tant du point de vue de la pénibilité pour les opérateurs que de l'efficacité des opérations. Ici, il s'agit de la conception d'un poste mettant en jeu une collaboration homme-robot. Le virtuel offre la possibilité d'explorer divers scénarii afin d'en choisir les plus vertueux d'un point de vue temps, énergie, ou impact sur l'humain. La comparaison réel-virtuel permet dans un premier temps de s'assurer que les simulations sont valides, puis l'on repose ensuite uniquement sur les simulations en virtuel, avec l'homme dans la boucle, ce qui permet d'économiser des ressources.

Optimiser la logistique

L'automatisation et la robotique s'appuient sur divers domaines tels que la perception de l'environnement et sa modélisation, mais aussi sur des outils transverses d'aide à la décision ou d'optimisation, qui peuvent être appliqués à la recherche de trajectoires minimisant la consommation énergétique.

L'adoption de la propulsion électrique ne suffira pas à décarboner le secteur de la mobilité ni la logistique. En revanche, l'amélioration de l'efficacité des organisations logistiques actuelles représente un potentiel immense : l'optimisation des stocks, du taux d'utilisation des véhicules sont autant de leviers à mettre en œuvre pour décarboner le secteur.

CAOR

Étude de l'application du machine learning à la logistique, dans une optique d'optimisation des flux, de recherche de performance énergétique et d'aide à la prise de décision.

Master management industriel et systèmes logistique.

Robotique et usine : algorithmes ; robots perceptifs mieux intégrés dans le processus de production.

CGS

Travaux sur l'Internet physique, nouveau paradigme de logistique visant à mutualiser les réseaux pour réduire l'empreinte environnementale.

- Thèse *Vers une logistique plus performante et résiliente par l'interconnexion des réseaux logistiques.*

La plateforme Alice, qui réunit 150 acteurs vise à décarboner le domaine de la logistique en s'attaquant à l'inefficience des organisations actuelles <https://www.etp-logistics.eu/>

CAS

Développement des algorithmes du système embarqué de la remorque électrique K-Ryole, solution de logistique urbaine à annulation d'effort.



La sobriété au cœur du traitement de l'information

La nécessité de réduire la consommation énergétique du numérique motive des travaux de recherches dans tous les domaines : optimisation des ressources informatiques, algorithmique, architecture matérielle, etc.

Dans cette quête de sobriété, l'efficacité énergétique des systèmes embarqués tels les smartphones est devenue un enjeu fondamental, en particulier pour des questions d'autonomie des batteries. Comprendre les différents aspects de la consommation de l'énergie et de la dissipation de chaleur au sein de ces dispositifs est donc une question clé.

De même, modélisations, simulations, calculs liés à l'intelligence artificielle ou applications doivent rechercher une utilisation raisonnée des ressources informatiques, de sorte à réduire la consommation énergétique liée à leur mise en œuvre. Sans parler de la blockchain dont l'impact environnemental est notoirement excessif.

CRI

Recherche d'autres mécanismes de régulation que la blockchain fondés sur des protocoles et des modes de gouvernance différents.

Avec l'ISIGE Conception d'applications smartphones frugales pour un projet européen de sensibilisation au développement durable.

La thèse *La loi de convexité énergie-fréquence de la consommation des programmes : modélisation, thermosensibilité et applications*, a mis en évidence de manière théorique et expérimentale la possibilité d'optimiser la consommation des systèmes informatiques en choisissant la fréquence d'horloge des processeurs adaptée.

MAT

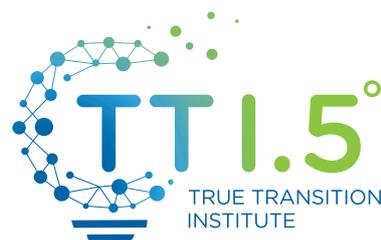
Recherche de méthodes de mécanique des matériaux permettant de limiter les ressources matérielles nécessaires à la réalisation de simulations, tout en conservant l'ensemble des paramètres physiques du modèle de référence, mais en réduisant la complexité.

CMM

Branche de l'analyse d'images, la morphologie mathématique consiste à comparer des images avec des formes ou à reconnaître des formes au sein des « images » (vidéos, images satellitaires, données structurées telles les graphes). Complémentaire de l'apprentissage profond, cette discipline trouve diverses applications concourant aux objectifs de la transition : caractérisation de la biosphère et classification de l'inventaire écologique grâce à l'image (avec CEREP, unité mixte d'écologie) ; développement de nouveaux matériaux plus légers ou d'isolants plus efficaces, étude des piles à combustible ; optimisation du poids des moteurs, avec des matériaux composites tissés. D'autres sujets d'études sont envisagés : identification des îlots de chaleur et suivi des espaces verts en ville ; étude des déperditions de chaleur et caractérisation de l'état du bâti, par analyse d'images satellite ou de thermographies dans l'IR lointain ; analyse de la pollution des villes grâce à des images de l'atmosphère révélant l'opacité de l'air liée à la présence de particules fines, etc.

L'IA ayant un impact environnemental élevé du fait de procédés de calcul très énergivores, CMM développe des méthodes utilisant des modèles intégrant des connaissances a priori dans des réseaux de neurones afin de réduire la taille et la consommation énergétique des algorithmes.

L'AMBITION D'UNE VÉRITABLE TRANSITION



Pour renforcer l'impact de son action, la Fondation Mines Paris et l'Ecole s'associent pour le lancement d'un nouvel Institut, le **True Transition Institute (TTI.5)**, 1.5 comme écho à l'objectif de limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C, dont la contribution s'inscrit dans l'élaboration d'une réponse aux menaces d'effondrement associées à l'anthropocène.

TRUE TRANSITION INSTITUTE

Le constat

Pour faire face à l'urgence climatique et pour suivre la recommandation du GIEC de limiter le réchauffement global à 1,5°C, nos sociétés doivent s'engager dans des transitions systémiques d'une ampleur sans précédent qui supposent des réductions considérables des émissions de GES (gaz à effet de serre) dans tous les secteurs. Cependant, et malgré les déclarations d'engagement de certains Etats vers la neutralité carbone, de nombreuses questions restent en suspens et nulle part au monde le changement de phase attendu n'est réellement mis en oeuvre de manière « convaincante ». Dans ce contexte, où il ne s'agit plus de rechercher le seul progrès pour la civilisation mais d'évaluer les conditions mêmes de son existence dans un nouvel équilibre thermodynamique, seule une approche systémique, prenant en compte les impacts multifactoriels et l'acceptabilité des mesures envisagées, est susceptible de dégager des chemins de transition réalistes vers une ère décarbonée.

L'Institut

Cette démarche intégrant la globalité des interactions et mettant l'homme au coeur des processus exige une réflexion scientifique pluridisciplinaire, à la fois rigoureuse et exhaustive. Mines Paris, grâce à la diversité et à l'excellence de ses activités de recherche, à ses multiples collaborations avec les mondes économique et académique, à son modèle de fonctionnement très décentralisé, dispose d'atouts de premier plan et d'expertises uniques lui permettant de contribuer de manière concrète et originale à l'élaboration du design de cette transition. Le nouvel institut TTI.5, structure « hors les murs », s'appuiera sur une vision partagée élaborée en co-construction par les différentes entités de Mines Paris.

Le design de solutions pour la transition

Notre objectif est de fournir au décideur des éléments lui permettant de construire une stratégie garante d'une bifurcation tenant compte à la fois des enjeux climatiques et des enjeux de développement pour élaborer des schémas sociaux et économiques concertés. Le « design » de cette transition puisera dans les solutions « bas-carbone » disponibles qui seront discutées de façon systémique en intégrant les contraintes liées : à l'offre technologique (incluant les technologies à venir telles CCS, CCUS, fusion et matériaux innovants), aux vecteurs (dont l'hydrogène), aux questions d'opération et de flexibilité des systèmes, de spatialité, de rythme de mise en place, d'aménagement du territoire, de modes de vie, de coûts et d'ingénierie de financement, de gouvernance, de régulation et de conditions institutionnelles, d'externalités, autant de sujets de prédilection des laboratoires de l'Ecole.

Une dynamique de collaboration et de rayonnement

L'institut TTI.5 propose de déployer une approche totalement innovante s'appuyant sur la confrontation originale de plusieurs prismes temporels et disciplinaires associant sciences de l'ingénieur et sciences économiques et sociales, alliant des approches empiriques et théoriques, approches et disciplines déjà présentes au sein de Mines Paris.

En intégrant l'ensemble de ces travaux dans son champ de réflexion, l'institut TTI.5 propose de donner une visibilité accrue de l'offre de l'Ecole et une meilleure articulation de ses contributions, tout en agrégeant des réseaux d'excellence nationaux et internationaux. Ceci doit permettre à Mines Paris de se positionner en lieu d'influence en interaction forte avec la société, pour éclairer le débat public et les choix des décideurs, mais également de réhabiliter la parole des ingénieurs face à un défi qui interroge leur rôle. En structurant les enseignements dispensés autour de la transition, avec la mise en place de « parcours » dédiés, la dynamique TTI.5 s'inscrit dans la refonte de cursus qui vise à répondre de manière encore plus adaptée aux attentes des élèves ingénieurs et élèves chercheurs, étudiants en masters et mastères, nombreux à souhaiter donner du sens à leur engagement professionnel sur le long terme.

Ce livret a été imprimé avec le soutien de la **Fondation Mines ParisTech**

La **Fondation Mines Paris**, reconnue d'utilité publique, a pour mission de partager et de soutenir les ambitions de l'École des Mines de Paris.

À travers sa formation et sa recherche scientifique d'excellence, l'École contribue à l'innovation technologique dans les secteurs de l'industrie et des services, y compris la santé, en favorisant les progrès technologiques et sociétaux.



PSL 



Fondation Mines ParisTech
60, boulevard Saint-Michel
75272 Paris Cedex 06
<https://www.fondation.minesparis.psl.eu>