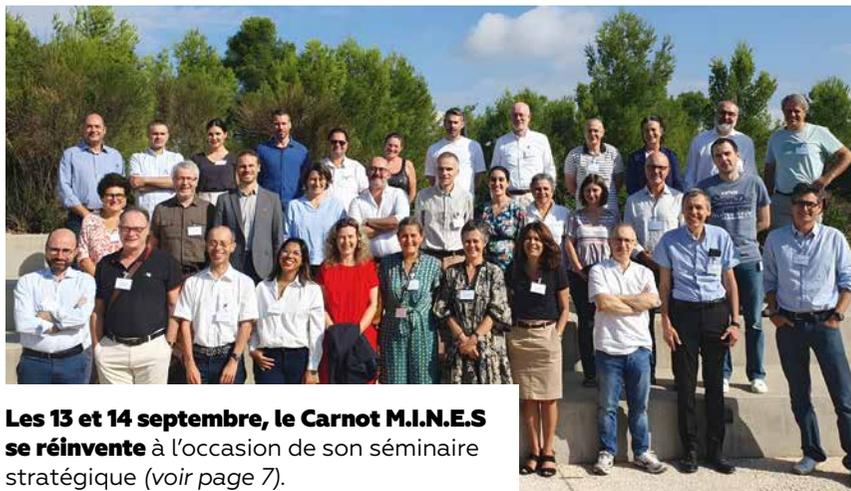




**Rapport  
d'activité**

**2023**

# Les temps forts de 2023



Les 13 et 14 septembre, le Carnot M.I.N.E.S se réinvente à l'occasion de son séminaire stratégique (voir page 7).

© Carnot M.I.N.E.S

IMT Mines Alès fête ses 180 ans.



© DIRC0V\_IMTMinesAlès

2



© Carnot M.I.N.E.S

Laurent Fulcheri, Mines Paris – PSL, lauréat du Prix Carnot pour son partenariat de longue durée avec l'entreprise américaine Monolith (voir page 15).

Le Labcom So Ph'Air (Solutions for Pheromones Analysis in Air), entre M2i Group et l'IMT Mines Alès renouvelé pour 3 ans (voir page 9).



© M2i Group

Mines Paris – PSL fête ses 240 ans.



© Mines Paris - PSL

Mines Paris - PSL lance l'Institut des Transformations Numériques, pour positionner les bénéfices de la transition numérique au service de la société (voir page 8).

## Deux nouvelles chaires industrielles :



GEOLEARNING

La chaire « Geolearning », pour évaluer les impacts et quantifier les risques associés aux changements climatiques. <https://chaire-geolearning.org/>

La chaire IMT « jumeaux numériques pour les systèmes industriels » (voir page 14).



© Institut Mines Télécom

# Le Carnot M.I.N.E.S, catalyseur des transitions

## Édito

Changer. Tout semble nous y contraindre. Crise climatique, conflit en Ukraine et au Proche-Orient, inflation, dette publique... et par-dessus tout cela, l'émergence fracassante de technologies aussi inquiétantes que fascinantes, reposant sur l'intelligence artificielle, dont on ne sait jusqu'où elles peuvent nous mener.

Changer, soit. Mais comment? Cette évolution à marche forcée de nos systèmes économiques, de nos organisations, de nos valeurs... nous avons la conviction que, pour ne pas la subir, il faut l'encourager.

C'est dans cet esprit qu'a été inauguré l'Institut des Transitions Numériques, afin d'accompagner individus et société à travers les transformations technologiques. Dans ce domaine, citons également la création de la chaire « jumeaux numériques pour les services industriels », lancée par MINES Saint-Étienne, IMT Mines Albi et IMT Mines Alès avec le soutien de la Fondation Mines-Télécom.

Cette même exigence préside également à l'élaboration de nos formations, qui conjuguent toujours éthique et innovation au service des étudiants.

Ainsi, dans le cadre du projet SEED (*Societal, Energy, Environmental, Industrial & Digital*) soutenu par l'Union européenne, IMT Atlantique a inauguré une nouvelle formation doctorale de 40 places.

C'est toujours cette vision qui se traduit, sur le plan technologique, par des travaux de pointe, porteurs d'espoir pour la transition environnementale, tels que ceux menés par IMT Nord Europe pour le stockage de l'hydrogène (Ecohydro).

Car s'il est une transition qui sous-tend toutes les autres, c'est bien celle qui concerne l'écologie. Dans ce domaine, les chercheurs de nos établissements membres poursuivent leurs activités sans relâche, comme le montrent leurs travaux sur « l'électrification des usages », thème du projet phare 2023 - ELECTRE - du Carnot M.I.N.E.S. À Mines Paris-PSL, le CERNA travaille par exemple sur l'efficacité macroéconomique et sociétale des aides à la rénovation des bâtiments, et le Centre de Gestion Scientifique sur les « avaries communes », principe du droit maritime hérité de la Rome antique.

Tout changer, donc. Pour qu'à la fin rien n'ait vraiment changé, comme le prédisait le héros de Tomasi di Lampedusa dans *Le Guépard*? Bien au contraire. Cette transition, nécessaire, inéluctable, acceptons-la pour ce qu'elle est : bien plus qu'une « bifurcation », une mutation profonde et souhaitable de nos modèles.



**Yannick Vimont**

Directeur du Carnot M.I.N.E.S

## Gouvernance

### Directeur

Yannick Vimont

### Directrice opérationnelle

Agnès Laboudigue

### Directeurs adjoints

David Delafosse

Éric Weiland

### Responsable administrative et financière

Anne Piant

# Le partenaire R&D des entreprises

C'est pour accompagner les entreprises dans leur démarche d'innovation que neuf des plus prestigieuses écoles d'ingénieurs françaises (Mines Paris - PSL, cinq Écoles des Mines intégrées à l'IMT, l'École polytechnique, l'ENSTA Paris et Clermont Auvergne INP) ont fédéré leurs laboratoires de recherche au sein du Carnot M.I.N.E.S, une structure dédiée à la recherche partenariale avec les entreprises. Ces laboratoires, parmi lesquels nombre d'UMR CNRS, s'appuient sur l'association ARMINES pour développer leur recherche sur contrats.

44

centres  
de recherche

1957

publications  
scientifiques  
de rang A par an

1859

personnels de recherche dont :

430 enseignants-chercheurs

491 ingénieurs et techniciens de recherche

842 doctorants (dont 179 CIFRE)

96 post-docs

## Nos 5 domaines d'expertise



Sciences de la terre et de l'environnement



Sciences et génie des matériaux



Énergétique et génie des procédés



Mathématiques appliquées, informatique et automatique



Économie, management, société

### Faciliter les échanges entre entreprises et chercheurs, une des missions du Carnot M.I.N.E.S

Développer la recherche partenariale implique une bonne visibilité des compétences et moyens disponibles, et notamment auprès d'un public cible pertinent et selon des modalités adaptées.

Pour cela, le Carnot M.I.N.E.S organise, accompagne ou participe à de nombreux événements de promotion des activités de recherche de ses centres auprès des industriels : journées industrielles thématiques, webinaires, *research days*, salons généralistes ou sectoriels, etc.

Ces événements permettent chaque année la réalisation de plusieurs centaines d'échanges directs entre nos équipes et des entreprises, partenaires actuels ou potentiels, autour de défis industriels, scientifiques ou techniques.





**Les instituts Carnot sont des structures de recherche publique labellisées par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, qui prennent des engagements forts pour mener et développer une activité de recherche partenariale au bénéfice de l'innovation des entreprises – de la PME au grand groupe – et des acteurs socio-économiques.**

### Un label exigeant, responsabilisant et engageant

Le label Carnot s'est imposé comme une garantie d'excellence scientifique et de qualité. Son objectif est de favoriser le développement de la recherche partenariale, c'est-à-dire la conduite de travaux de recherche menés par les meilleurs laboratoires français et leurs plateformes technologiques en partenariat avec des acteurs socio-économiques, notamment avec des entreprises.

Grâce à son fort ancrage territorial et son approche pluridisciplinaire, le réseau Carnot offre aux entreprises de tous les secteurs industriels les ressources R&D dont elles ont besoin pour développer leur compétitivité.

### Comment finançons-nous nos actions ?

En recevant un abondement de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) proportionnel au volume de nos contrats bilatéraux de R&D.

Ce financement est mis à profit pour :

- Anticiper les besoins futurs des industriels et enrichir nos expertises au travers du soutien financier de projets sélectionnés (voir les projets lauréats des dernières années, pages 10 à 12).
- Renforcer notre professionnalisme dans la relation partenariale.



© Carnot M.I.N.E.S

Le groupe H2MINES, lors du salon Hyvolution 2023.

### Les Carnot s'associent en réponse aux besoins des filières industrielles

Offrir une large gamme de compétences aux entreprises d'une filière, tel est l'enjeu de l'organisation en réseau des Carnot. Le Carnot M.I.N.E.S s'engage ainsi collectivement auprès de quatre filières stratégiques pour l'économie française : les énergies à faible impact carbone, la mode et le luxe, l'industrie du futur, la santé. En lien étroit avec les Comités Stratégiques de Filières (CSF) concernés, cette approche collaborative permet d'offrir aux entreprises des réponses exhaustives et un bon niveau de maturité technologique.

### Chiffres clés | Un label d'excellence

39 Carnot

20%  
des effectifs de la recherche publique

55%  
de la R&D financée par les entreprises en partenariat avec la recherche publique est confiée au réseau Carnot

1150  
brevets prioritaires déposés  
(1<sup>er</sup> déposant français)



# Ambition et stratégie

## Notre ambition: mettre l'innovation à la portée de toutes les entreprises

Quelles que soient leur taille, leur situation géographique ou leur activité, les entreprises ont besoin d'innover, non seulement pour rester compétitives dans une économie mondialisée, mais encore pour s'adapter aux transitions énergétique, écologique et numérique.

Par son caractère pluridisciplinaire et le professionnalisme de sa relation partenariale, le Carnot M.I.N.E.S est en mesure d'accompagner les entreprises les plus diverses, à tous les stades de leur croissance, de la start-up au grand groupe, dans le développement de leurs procédés industriels ou de nouveaux produits et services.

## Nos moyens: l'art de mettre en synergie les compétences

Qu'il s'agisse d'électrification des usages, de santé, de recyclabilité des polymères ou d'industrie responsable, nos centres de recherche bénéficient de la dynamique de financement de projets Carnot de grande ampleur. Ainsi, chaque année, entre douze et vingt équipes de l'institut s'associent pour développer de nouvelles compétences interdisciplinaires au service d'un enjeu d'actualité. La synergie créée par ces projets phares place le Carnot M.I.N.E.S parmi les leaders de la recherche sur ces sujets auprès des entreprises.

## Une excellence scientifique reconnue à l'international

En conformité avec ses objectifs, le Carnot M.I.N.E.S a encore développé son activité à l'international en 2023, contribuant ainsi à la renommée de la recherche française à l'international.

L'excellence scientifique de nos chercheurs a été saluée par l'obtention de bourses et de prix, mais aussi par la coordination de projets collaboratifs européens, la publication dans les meilleures revues internationales ou encore l'invitation de nos chercheurs à de prestigieuses conférences.

En parallèle, les compétences et moyens de l'institut ont fait l'objet d'une promotion particulière au sein des grands salons internationaux.

## Séminaire stratégique : le Carnot M.I.N.E.S se réinvente

Les 12 et 13 septembre, les 9 établissements membres de l'institut se sont donné rendez-vous à Aix-en-Provence pour se dessiner un avenir.



Directeurs de la recherche, chefs de centres de recherche, enseignants-chercheurs, responsables et chargés du développement partenarial, toutes les forces vives de l'institut étaient représentées pour définir ensemble les contours du futur de l'institut.

Deux journées de travail pour (re)penser l'ambition collective et décliner les moyens d'actions à mettre en œuvre, avec pour objectif le renouvellement du label pour la période 2026-2030.

© Carnot M.I.N.E.S

## La qualité au cœur de la stratégie d'ARMINES



Fin 2023, ARMINES obtient sa première certification ISO 9001:2015 en reconnaissance de la qualité de ses activités de contractualisation et de suivi administratif et financier de ses contrats de recherche partenariale.

**Découvrez la politique de qualité d'ARMINES :**

<http://cloud.minesparis.psl.eu/index.php/s/JL5ZBJazdJpzpLX/download>

# Mettre l'innovation à la portée de toutes les entreprises

## La chaire etilab publie son premier rapport sur l'empreinte carbone des ETI françaises

Un an après avoir été créée, la chaire de recherche et d'enseignement etilab Mines Paris - PSL publie son premier rapport « Décarbonation, réindustrialisation & Entreprises de Taille Intermédiaire » sur la place des entreprises de taille intermédiaire (ETI) dans la décarbonation de l'industrie française. Les résultats, qui s'appuient sur une étude détaillée de la consommation d'énergie dans l'industrie, montrent que les ETI génèrent autant de gaz à effet de serre (GES) que les grandes entreprises. En considérant leurs consommations énergétiques, le rapport a permis d'identifier les 12 secteurs les plus émetteurs de GES et propose des leviers d'actions visant à faciliter la mise en conformité des ETI françaises avec la CSRD, (Corporate Sustainability Reporting Directive), le nouveau cadre européen s'imposant désormais à toutes les entreprises de taille moyenne.



Pour télécharger le rapport:

[« etilab-decarboner-les-ETI-30nov23 »](https://etilab-decarboner-les-ETI-30nov23)

<https://etilab.minesparis.psl.eu>



© ITN

## L'ITN : pour que la transformation numérique reste au service de la société

Avec l'Institut des Transformations Numériques (ITN), Mines Paris - PSL mobilise ses forces de recherche pluridisciplinaires et ses formations tant pour accélérer l'industrialisation et l'innovation technologique que pour en favoriser l'adoption et les futurs usages. Dans un contexte où l'homme et la machine devront tout à la fois cohabiter et collaborer, Mines Paris - PSL mobilise 19 centres de recherche afin de produire un effet de levier, en s'appuyant sur des fondements mathématiques solides et en lien étroit avec le monde économique, pour favoriser le passage à l'échelle de la « start-up innovante » à l'industrialisation au service d'une société durable et responsable.

## La formation, une des voies de transfert des résultats de nos recherches aux entreprises

La formation étant l'un des canaux privilégiés de transfert des résultats de recherches aux entreprises, le Carnot M.I.N.E.S met à disposition des dirigeants, chercheurs, ingénieurs et techniciens, en plus de ses formations initiales, des formations dispensées par ses chercheurs et basées sur leurs innovations les plus récentes. Mines Paris Executive Education propose des formations continues sur catalogue et sur mesure et que Mines Paris - PSL a mis en place le mastère spécialisé Deeptech & Innovation, pour accompagner et former les candidats à la création d'entreprises innovantes à partir des dernières avancées de la recherche scientifique.

Plus d'informations :

<https://executive-education.minesparis.psl.eu/>

<https://deeptech.minesparis.psl.eu/>

# Une collaboration phare : un laboratoire commun



## IMT Mines Alès et M2i dupent les insectes ravageurs pour mieux protéger les cultures

M2i, leader européen de la production et de la distribution de phéromones de biocontrôle pour la protection biologique des cultures, est une PME de 200 salariés qui dispose de 4 sites en France et d'un portefeuille de 22 familles de brevets déposés depuis 2012.

Plutôt que de détruire les insectes et autres ravageurs de plantations par des pesticides, imitons-les ! Tel est le principe du biomimétisme et du biocontrôle, des procédés en plein essor dans l'agriculture. Cette alternative aux pesticides offre des solutions concrètes pour protéger les cultures tout en préservant l'environnement et en se conformant à des réglementations européennes de plus en plus restrictives.

« Nous sommes heureux de collaborer avec IMT Mines Alès depuis de nombreuses années. Créer des synergies entre la recherche appliquée et les savoirs scientifiques et académiques nous motive et permet de progresser plus vite »

**Patrick Durand,**  
directeur du site M2i de Lacq

Pour évaluer l'efficacité de ses méthodes et proposer des formulations optimales, M2i a fait appel à l'équipe de

Recherche sur les Interactions des Matériaux avec leur Environnement (RIME) d'IMT Mines Alès (UMR 5254 IPREM, basée à Pau).

Leur laboratoire commun baptisé « So ph'air » (Solutions for Pheromones Analysis in Air) étudie la diffusion dans l'air de molécules qui reproduisent l'action de phéromones : ces composés transmettent un message similaire à celui des femelles pour leurrer les mâles, induisant une baisse de la reproduction, donc de la population d'insectes ravageurs. L'objectif principal de ce programme est de déterminer expérimentalement les paramètres décrivant le transfert des phéromones vers l'air, puis de modéliser les processus d'émission et de dispersion des phéromones dans les champs dans le but d'estimer la zone d'action et la persistance dans le temps des phéromones à concentration suffisante pour maintenir l'efficacité du traitement.

Depuis la signature du partenariat en 2020, une première thèse Cifre a été lancée pour étudier les cinétiques de diffusion des phéromones en fonction des formulations en conditions contrôlées et développer des méthodes de mesures applicables à l'échelle des espaces cultivés (serres et champs). Une seconde a démarré en février 2024 pour modéliser la dispersion de ces substances actives et apporter de nouveaux éléments pour valider ces solutions de biocontrôle en conditions réelles.

Fort de ces avancées, le laboratoire commun a été reconduit pour trois années supplémentaires, avec comme ambition de lever d'autres verrous scientifiques du biocontrôle : quelles sont les molécules bioactives, leurs doses efficaces



Agrafe de palissage pour la vigne imprégnée de phéromone pour lutter contre le ravageur.

et leurs effets sur le comportement de l'insecte ? Pour cela, un laboratoire d'électroantennographie a été créé, où des tests de comportements sont développés. Une équipe de six personnes (3 IMT, 3 M2i) coopère aujourd'hui sur le site de M2i Group à Lacq, à quelques kilomètres de Pau.

« Accompagner la croissance et le développement, y compris à l'international, d'une PME française d'un secteur de pointe à travers un partenariat pérenne est très valorisant pour notre équipe. La forte vocation environnementale de ce projet est par ailleurs une source d'engagement supplémentaire pour nous »

**Valérie Desauziers,**  
responsable du laboratoire commun,  
IMT Mines Alès

### Plus d'informations :

<https://www.carnot-mines.eu/biomimetisme-protections-des-cultures-sans-pesticides-so-phair/>

**Valérie Desauziers,**  
[valerie.desauziers@mines-ales.fr](mailto:valerie.desauziers@mines-ales.fr),  
enseignante-chercheuse, IMT Mines Alès

© Lohesia Borrana (photo : M2i)

# ELECTRE

## Des recherches pluridisciplinaires pour s'affranchir des énergies fossiles

**3 questions à**  
**Philippe Blanc,**  
coordinateur  
du projet



© Philippe Blanc

### Quel rôle peut jouer l'électrification de certains usages dans la transition énergétique ?

Pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) a défini un scénario<sup>1</sup> dans lequel la part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale mondiale va augmenter de 20 % actuellement à 50 %. Cette électricité, produite notamment à partir de sources d'énergies renouvelables doit permettre de s'affranchir de la dépendance aux énergies fossiles de nombreux usages, tels que les transports, le chauffage, la climatisation, ou encore certains procédés industriels.

Cette électrification prévue dans nombre de scénarios prospectifs, comme « futurs énergétiques 2050 »<sup>2</sup> de RTE, fait cependant face à des défis scientifiques et techniques très divers, à différentes échelles : des matériaux aux systèmes énergétiques de pays.

### Justement, quels sont les défis que le Carnot M.I.N.E.S se propose d'adresser ?

Ce projet phare est structuré selon quatre grands axes :

- Les matériaux pour des composants comme des batteries, des électrolyseurs et piles à combustibles ou encore des conducteurs aux propriétés mécaniques et thermiques spécifiques.
- Le stockage d'énergie pour l'optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique, en tenant compte d'aspects tant technologiques qu'économiques.
- L'électrification de procédés industriels, notamment par des approches hybrides combinant électricité bas-carbone et combustion d'hydrogène.
- La pertinence, les limites et les difficultés à venir de l'électrification des usages, par exemple les contraintes sur les ressources minérales et critiques.

**Philippe Blanc,**  
[philippe.blanc@minesparis.psl.eu](mailto:philippe.blanc@minesparis.psl.eu), coordinateur du projet, professeur à Mines Paris - PSL au sein du centre Observation, Impacts, Énergie (O.I.E).

### Quels sont les impacts potentiels pour les secteurs industriels ciblés par le projet ?

Par les travaux pluridisciplinaires de ce projet, mêlant sciences de l'ingénieur, économie et sociologie, nous avons l'ambition de faire monter en maturité des solutions originales de nos équipes et ainsi favoriser, *in fine*, leur appropriation par l'industrie. Parmi les résultats attendus, on peut citer de nouveaux procédés de fabrication de composants à faible impact environnemental, des solutions logicielles de dimensionnement de systèmes électriques intégrant de l'hydrogène décarboné, un outil de modélisation de l'électrification partielle de procédés industriels à fort appels de puissance ou encore un guide méthodologique de déploiement d'infrastructures de production électrique intégrant l'analyse de cycle de vie (ACV).

<sup>1</sup> Net Zero Emissions by 2050 Scenario

<sup>2</sup> <https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-12/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats.pdf>

### Quel impact sur les matériaux critiques ?

Passer d'une dépendance aux hydrocarbures à l'électrification des usages impose notamment de mener des réflexions sur les contraintes en ressources minérales et matériaux critiques des technologies de transport de l'électricité et de stockage d'énergie, notamment le cuivre, le nickel, le lithium et certaines terres rares. Avec l'appui de deux post-doctorants des centres PERSEE et Géosciences de Mines Paris - PSL, ce projet vise à la production de rapports de synthèse, à destination des décideurs industriels et publics, pour l'identification des principaux risques de pénuries et de goulets d'étranglement en ressources minérales et l'orientation des choix technologiques des opérateurs de réseaux et producteurs d'électricité.

**12** centres  
de recherche

**6** écoles (Paris,  
Saint-Etienne, Albi, Alès,  
Atlantique, Nord Europe)

**7** thèses

**6** post-docs

Budget :

**1,4 M€**

Période :

**2023-2026**  
Électrification / Transition  
énergétique / Industrie /  
Transports

# CARINGS

## L'ingénierie au cœur de la révolution santé

### Optimiser l'ergonomie du poste de travail par la capture du geste

Les troubles musculosquelettiques (TMS) peuvent affecter les travailleurs dont la posture soumet le corps à des contraintes répétées. Ces TMS sont à l'origine de 87 % des maladies du travail et concernent de nombreux secteurs d'activité : transport et logistique, industrie, agroalimentaire, BTP, etc.

Pour adresser cet enjeu sociétal, économique et de santé publique, trois équipes de recherche complémentaires se sont mobilisées afin de proposer des rétroconceptions ergonomiques optimales des postes de travail : le CERIS d'IMT Mines Alès, le Centre de Microélectronique de Provence de MINES Saint-Etienne et le Centre de Robotique de Mines Paris - PSL.

En alliant génie industriel et recherche opérationnelle, les chercheurs tentent de maîtriser et caractériser finement, et en temps réel, le score ergonomique du corps entier (REBA : Rapid Entire Body Assessment). Un opérateur est pour cela équipé de 17 capteurs et 3 capteurs indépendants peuvent être placés sur des outils ou des objets que celui-ci manipule.

Ces données sont ensuite injectées dans un environnement virtuel, en suivant un processus d'optimisation de plusieurs indicateurs de performance (pénibilité, temps, coûts et productivité). L'atelier virtuel est enfin réintégré sur le terrain, pour vérifier l'applicabilité et l'adéquation de cette configuration optimale, tant pour l'opérateur que pour l'espace de travail. Des démonstrations sont en cours de finalisation avec deux partenaires industriels, Airbus Helicopters et WBI.

La prochaine phase du projet consistera à proposer des modèles d'aide à la décision centrés sur l'humain avec prise en compte des scores ergonomiques. Également, le choix entre la correction des postures en donnant des recommandations aux opérateurs ou la proposition d'autres trajectoires plus ergonomiques et moins pénibles pour les opérateurs ; voire une reconfiguration de l'espace de travail, seront proposées.



Affichage du calcul du score REBA en streaming avec Unity (score REBA sévère en rouge, moyen en jaune).

**Pierre Slangen**, [pierre.slangen@mines-ales.fr](mailto:pierre.slangen@mines-ales.fr),  
professeur, IMT Mines Alès



Marius Huguet et Vincent Augusto - Projet TRACKING.

### TRACKING: la géolocalisation pour améliorer la gestion des urgences hospitalières

Des équipes IMT Mines Albi, MINES Saint-Etienne et Mines Paris - PSL expérimentent une technologie de géolocalisation indoor au service de la gestion des urgences de l'hôpital Le Corbusier à Firminy. Cette technologie se présente sous la forme d'un capteur, de la taille d'un badge, que portent les professionnels de la santé pendant leur service.

Un résultat significatif indique que la part des activités directement liées aux soins représente en moyenne seulement un tiers du temps total des médecins, tandis que les activités non directement liées aux soins semblent largement attribuables à la charge administrative et aux déplacements. Un algorithme capable de prédire le type de professionnel de santé (médecin, infirmier d'orientation, etc.) et de détecter un changement d'activité non planifié au cours de la journée a également été développé.

Dans le prolongement de ces travaux, les chercheurs examinent désormais le potentiel de l'accessibilité à des informations en temps réel pour modéliser les flux de patients à travers un jumeau numérique.

#### Plus d'informations :

<https://www.carnot-mines.eu/tracking-geolocalisation-gestion-des-urgences-hospitalieres/>

**16** centres  
de recherche

**6** écoles  
(Paris, Alès, Albi, Nord  
Europe, Saint-Étienne,  
Clermont Auvergne INP)

**7** thèses

**8** post-docs

Budget:

**1,9** M€

Période:

**2022-2025**  
Ingénierie et santé /  
Numérique / Pollution  
de l'air

# Industrie Responsable

## Vers une industrie résiliente, durable et attractive

### Axe « Technologies et plateformes à haute valeur ajoutée »

#### Rendre possible l'utilisation de l'hydrogène décarboné par l'industrie grâce à l'étude de la cinétique chimique

La combinaison du gaz naturel avec d'autres additifs tels que l'hydrogène décarboné constitue une piste très prometteuse pour améliorer l'empreinte carbone d'installations industrielles sans impacter leur fonctionnement et leur rendement.

Mais des verrous techniques restent à lever et de nombreux paramètres et données doivent être déterminés précisément : température de flamme, délais d'auto-inflammation, etc. De plus, les émissions de polluants doivent également être prédites et limitées.

L'Unité Chimie et Procédés de l'ENSTA, IP Paris a donc tenté de déterminer comment :

- augmenter les bases de données expérimentales pour valider/raffiner des mécanismes cinétiques détaillés sur ces données et les données de la littérature ;
- prédire les émissions de polluants selon la composition, température et pression des mélanges H<sub>2</sub>/air et CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/air.

Pour cela, les vitesses fondamentales de flammes de mélanges méthane/air dans diverses conditions ont été mesurées expérimentalement. Un travail de modélisation a été fait sur ces données expérimentales pour discriminer les modèles cinétiques existant dans la littérature et pour améliorer leurs capacités prédictives. Les modèles cinétiques ainsi mis en œuvre sont détaillés et rassemblent toutes les réactions qui surviennent réellement lors du phénomène de combustion, ouvrant la voie au calcul des dimensionnements des appareillages industriels.

**Laurent Catoire**, [laurent.catoire@ensta-paris.fr](mailto:laurent.catoire@ensta-paris.fr), professeur, ENSTA Paris

### Axe « Reconfiguration des réseaux productifs »

#### Concevoir des systèmes de production adaptatifs et robustes dans un contexte de crise et d'interdépendance

La qualité des décisions que les responsables de production sont amenés à prendre est plus que jamais dépendante des risques et opportunités qu'ils sont capables de traiter, dans un laps de temps très court, alors même que les étapes et les échelles géographiques et temporelles se multiplient. Pour pouvoir gérer ces situations, il faut que le système dispose de degrés d'adaptation suffisants, connus et mobilisables.

Pour autant, la crise COVID-19 a démontré que certains systèmes de production sont capables d'être reconfigurés pour répondre à des demandes imprévues et urgentes.

Le Centre de Gestion Scientifique (Mines Paris – PSL) et le Centre de Génie Industriel (IMT Mines Albi) ont collaboré afin de fournir une approche permettant aux industriels d'anticiper les prochaines crises. En se basant sur le concept d'Internet Physique, qui préconise notamment de développer l'interconnexion des chaînes logistiques aussi bien en production qu'en distribution, les équipes ont tenté de déterminer :

- s'il est possible d'envisager les possibilités d'adaptation comme un régime de fonctionnement normal des systèmes de production ?
- comment modéliser le potentiel de reconfiguration et d'adaptation de tels systèmes ?
- les propriétés nécessaires aux systèmes de production pour autoriser de telles adaptations de manière organisée.

Les équipes se sont appuyées sur des modèles de description ontologique des systèmes de production, plus à même d'appréhender des situations exceptionnelles mais amenées à se (re) produire. Un tel modèle a été construit afin de tester la capacité d'un système de production à réaliser un produit de manière non anticipée. Ces travaux ont été étendus à un réseau productif, permettant à un ensemble d'entreprises de décrire son potentiel d'adaptation et d'optimiser la réalisation du produit voulu. Ces résultats ont été validés sur deux cas pratiques, un gel et un cadre de vélo, avec des résultats probants.

Ces travaux ont permis de concevoir et développer les concepts nécessaires aux systèmes de configuration adaptatifs des systèmes de production du futur qui permettront, dans un contexte foncièrement instable, d'augmenter la capacité des réseaux de production à se reconfigurer dynamiquement pour maintenir leurs niveaux de performance de manière responsable et durable.

**Éric Ballot**, [eric.ballot@minesparis.psl.eu](mailto:eric.ballot@minesparis.psl.eu), professeur, Mines Paris - PSL  
**Matthieu Lauras**, [matthieu.lauras@mines-albi.fr](mailto:matthieu.lauras@mines-albi.fr), professeur, IMT Mines Albi

**19** centres de recherche

**7** écoles (Paris, Albi, Alès, Atlantique, Saint-Étienne, Clermont Auvergne INP, ENSTA)

**4** thèses

**12** post-docs

Budget :

**1,6** M€

Période :

**2021-2024**  
Industrie /  
Résilience /  
Logistique /

# Transition environnementale

## Vers une maîtrise des paramètres de production du PET recyclé

Alors que la réglementation européenne impose l'incorporation d'au moins 30 % de PET recyclé (rPET) dans les bouteilles plastiques d'ici 2025, le soufflage de ce matériau est plus complexe que son équivalent vierge. En effet, la gamme de formage est plus restreinte avec une difficulté à obtenir une distribution d'épaisseurs homogène.

Dans le cadre d'une thèse avec l'entreprise SIDEL, l'un des principaux fournisseurs mondiaux des solutions pour l'emballage des liquides alimentaires, les équipes du CEMEF ont cherché à mieux comprendre les variations de comportement induites par le recyclage mécanique. À cette fin, un PET vierge et différents grades recyclés mécaniquement ont été caractérisés en conditions statiques et dynamiques. Les chercheurs ont par exemple constaté une nécessité de souffler plus chaud mais sans cristalliser thermiquement.

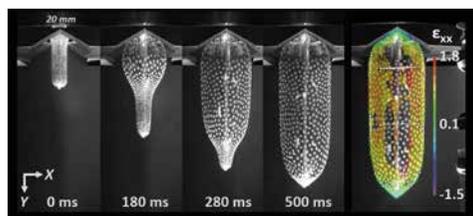


Figure 1 : Soufflage-étirage libre (sans le moule) d'une préforme en PET recyclé et du champ de déformation transverse déterminé par corrélation d'images.

Les résultats de cette étude améliorent la compréhension du comportement du rPET en soufflage pour un ajustement plus efficace des paramètres de mise en forme sur ligne de production par le partenaire industriel.

**Christelle Combeaud,**  
[christelle.combeaud@minesparis.psl.eu](mailto:christelle.combeaud@minesparis.psl.eu),  
maître de recherche, CEMEF, Mines Paris - PSL

**Jean-Luc Bouvard,**  
[jean-luc.bouvard@minesparis.psl.eu](mailto:jean-luc.bouvard@minesparis.psl.eu),  
professeur CEMEF, Mines Paris - PSL

## Découvrez les nouveaux médias du Carnot M.I.N.E.S



**Courant porteur, le podcast du Carnot M.I.N.E.S sur les grandes transitions mondiales, revient pour une deuxième saison consacrée à la recyclabilité des polymères. Ou comment la recherche aide entreprises et institutions face à la transition environnementale.**

**Courant porteur est disponible sur toutes les plateformes d'écoute. Abonnez-vous !**



## Dernières avancées en ACV environnementale et sociale

Paula Perez-Lopez est experte en Analyse de

Cycle de Vie (ACV) environnementale et sociale des technologies renouvelables de production d'énergie.

Elle a contribué en 2023 à de nombreux programmes de recherche avec des industriels et entreprises du secteur de l'énergie :

- Une collaboration avec RTE sur les scénarios « Futurs 2050 » à travers la réalisation de l'étude ACV d'évaluation de scénarios d'électrification des usages
- Des travaux sur l'éolien, et notamment l'éolien en mer, pour l'ACV environnementale et sociale dans le cadre du projet LIF-OWI, avec RTE, EDF, Total Energies, Engie et Vallourec
- Des travaux de modélisation ACV de systèmes PhotoVoltaïques (PV), y compris les étapes de fin de vie, dans le cadre d'une thèse CIFRE avec Total Energies et l'IPVF.

**Paula Perez-Lopez,**  
[paula.perez-lopez@minesparis.psl.eu](mailto:paula.perez-lopez@minesparis.psl.eu),  
chargée de recherche et responsable des activités « Impacts environnementaux »,  
Centre O.I.E, Mines Paris - PSL

# La R&D au service de la création de valeur

## MINES Saint-Etienne propulse la start-up Wallace Technologies

Wallace Technologies développe une batterie innovante qui repose sur le système Stirling – un moteur à combustion externe qui fonctionne avec une source froide et une source chaude – dont le rendement est amélioré grâce à un échangeur thermique haute compacité.



© MINES Saint-Etienne & Wallace Technologies

L'entreprise s'est tournée vers le Centre de Science des Matériaux et des Structures (SMS) de MINES Saint-Etienne pour réaliser un échangeur avec des parois très fines, de l'ordre de 0,2 à 0,3 mm. Pour réaliser cette prouesse technique, les chercheurs ont adapté un procédé de fusion laser Laser Powder Bed Fusion (LPBF, qui consiste à fusionner localement une couche de poudre de quelques microns, puis de recommencer couche par couche pour monter la pièce). Ils sont ainsi parvenus à produire un nouveau prototype en aluminium de 13 cm de haut et 8 cm de diamètre, dont l'impression a duré trois journées entières.

### Plus d'informations :

<https://www.carnot-mines.eu/fabrication-additive-comment-lemse-propulse-la-start-up-stephanoise-wallace/>

## L'Université de Clermont-Auvergne et Michelin : un partenariat de pointe pour modéliser les matériaux de demain

L'Institut de Chimie de Clermont-Ferrand (ICCF), Michelin, le CHU de Clermont et le CNRS collaborent au sein du laboratoire commun « SimatLab » pour déterminer les propriétés des matériaux polymères à partir d'une vision microscopique des interactions entre les molécules. Des simulations puissantes, assistées par intelligence artificielle, permettent de produire des modélisations qui dispensent de manipuler des produits dangereux ou coûteux, mais aussi de devoir effectuer un grand nombre d'expérimentations. En effet, plus de 200 produits entrent dans la composition d'un pneu, d'où l'intérêt de Michelin à développer des systèmes prédictifs afin de choisir plus rapidement les matériaux pour les pneus de demain.

Mais les applications ne s'arrêtent pas là. Ainsi en médecine, le SimatLab se penche sur les systèmes de perfusion afin de comprendre le phénomène d'adsorption des médicaments dans les systèmes de perfusion.



© SimatLab

### Plus d'informations :

<https://www.carnot-mines.eu/modelisation-des-materiaux-polymeres-un-partenariat-de-pointe/>

## L'IMT lance la chaire de recherche « Jumeaux Numériques pour les Systèmes Industriels »



© Institut Mines Télécom

Optimisation des flux logistiques, empreinte carbone d'une activité, réorganisation de la production, nouvelles stratégies d'exploitation, maintenance... les industriels doivent prendre des décisions complexes et rapides. Dans ce contexte, le jumeau numérique, en modélisant le réel à l'aide d'indicateurs de performance, permet d'éclairer les décisions. Les experts de la chaire veulent ainsi augmenter les capacités des jumeaux numériques. Les travaux consisteront à offrir une visualisation globale des systèmes en présence et non pas de simples actifs de composants. Les différents modèles devront pouvoir être assemblés pour créer une simulation de l'ensemble du système et interagir avec lui. Différents niveaux pourront s'articuler et être combinés : modèle numérique, ombre numérique, jumeau numérique.

Les résultats seront testés et appliqués chez les industriels partenaires : Siemens Digital Industries Software, Laboratoires Pierre Fabre et Inoprod. Cette chaire est commune aux écoles MINES Saint-Etienne, IMT Mines Albi et IMT Mines Alès avec le soutien de la Fondation Mines-Télécom.

### Plus d'informations :

<https://www.imt.fr/institut-mines-telecom-lance-la-chaire-de-recherche-digital-twins-for-industrial-system/>

# International : contributions et reconnaissance

## Piloter le patrimoine industriel pour gérer la transformation « 4.0 » : le cas de la Haute Horlogerie

L'industrialisation est-elle un danger pour l'identité de l'entreprise ? Loin d'être caricaturale, cette interrogation est particulièrement vive dans le monde du Luxe. Ses acteurs sont tiraillés entre la poursuite, promue par la digitalisation, d'une industrialisation de l'artisanat et la promesse commerciale d'un objet héritier de la tradition rendu unique par sa finition artisanale.

En collaborant avec l'entreprise suisse de Haute Horlogerie Audemars Piguet, le Centre de Gestion Scientifique de Mines Paris – PSL a investigué les ressources de pilotage disponibles pour les industriels et managers qui souhaitent maîtriser l'impact de l'industrialisation 4.0 sur le patrimoine industriel de leur entreprise (compétences spécifiques et valeur de l'objet associée).



Dans la continuité des travaux sur le rôle cognitif du patrimoine pour guider l'innovation, l'équipe a montré qu'il existe trois axes d'innovation à impact sur le patrimoine, puis les dynamiques d'interactions entre acteurs sur le patrimoine industriel. Cela a amené à proposer un dispositif conjuguant Gestion des Ressources Humaines industrielle, gouvernance responsable et stratégie d'innovation industrielle pour un pilotage actif des évolutions du patrimoine industriel en cas d'industrialisation.

**Sophie Hooge**, [sophie.hooge@minesparis.psl.eu](mailto:sophie.hooge@minesparis.psl.eu), professeure à Mines Paris – PSL. Centre de Gestion Scientifique (CGS) – i3 UMR CNRS 9217

## Laurent Fulcheri reçoit le Prix Carnot de la Recherche Partenariale pour sa collaboration de longue durée avec l'entreprise américaine Monolith

Une innovation initiée il y a plus de dix ans pour la production d'hydrogène « turquoise » par pyrolyse du gaz naturel à haute température.



Plus d'informations :

<https://www.youtube.com/watch?v=qHfIAlad1Zs>

## Animer des projets collaboratifs ambitieux à forte composante industrielle

IMT Atlantique coordonne le programme doctoral SEED, soutenu par l'Union européenne ainsi que dix partenaires industriels et académiques de premier plan. 40 doctorants vont ainsi profiter d'une formation doctorale de pointe au cours des cinq prochaines années, dans une approche interdisciplinaire, intersectorielle et internationale pour mieux accompagner les grandes transitions.

Plus d'informations :

<https://www.imt-atlantique.fr/fr/actualites/cofund-seed-formation-doctorale>

IMT Nord Europe, avec la participation d'IMT Mines Alès, coordonne le projet EcoHydro qui fédère des acteurs industriels de premier plan (Arkema, Airbus, Temsa) afin de mettre au point un matériau composite à base d'Elium®, une résine thermoplastique recyclable, pour le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse ou liquide cryogénique.

Plus d'informations :

<https://imtech.imt.fr/2023/12/05/ecohydro-composites-recyclables-pour-stockage-hydrogene/>

