

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2023

INNOVER
LA MOBILITÉ

CARNOT

IFPEN TRANSPORTS ENERGIE



Page

03

LE MOT DU DIRECTEUR

04

IFP ENERGIES NOUVELLES

05

LE CARNOT IFPEN TRANSPORTS ENERGIE EN BREF

06

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

- MOTORISATIONS ÉLECTRIQUES
- MOBILITÉ HYDROGÈNE
- DIGITALISATION DANS LA MOBILITÉ

09

GRAND ANGLE

- BATTERIES : OUTILS DE SIMULATION, CONCEPTION, MATÉRIAUX

11

ACTIONS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET DE PROFESSIONNALISATION

15

UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

17

SALONS ET MANIFESTATIONS 2023

LE MOT DU DIRECTEUR



Dans le contexte d'une industrie automobile en pleine transformation, et d'une façon générale d'un secteur des transports à la recherche de solutions pour les futurs systèmes de propulsion et leurs vecteurs énergétiques associés, le Carnot IFPEN Transports Energie (TE) continue d'œuvrer pour accélérer la transition vers une mobilité durable. Pour cela, il se diversifie et oriente son ressourcement scientifique pour anticiper les besoins en solutions technologiques et digitales des acteurs socio-économiques. Au cœur de ses travaux : la décarbonation, et en particulier l'électrification des véhicules, avec des avancées significatives dans le domaine des batteries et de l'électronique de puissance.

En 2023, la digitalisation a constitué un autre pilier d'innovation, le Carnot ayant renforcé son positionnement dans le domaine de l'analyse environnementale des transports au moyen notamment des analyses de cycle de vie (ACV) et des outils d'aide à la décision pour la mobilité et la qualité de l'air sur les territoires. En collaboration avec divers partenaires publics et industriels, nos équipes ont mené des études sur les aspects techniques, économiques, et environnementaux de la décarbonation du secteur des transports : les résultats sont désormais accessibles sur une page FAQ créée pour l'occasion*. Autre événement structurant : le lancement du PEPR MOBIDEC dont les travaux portent sur la collecte, l'analyse et le traitement des données de mobilité pour le développement d'une mobilité sobre, souveraine et résiliente.

Nous avons en outre continué à élargir nos domaines de recherche et les partenariats associés dans le cadre d'une recherche collaborative particulièrement dynamique. Les réponses apportées aux appels à projets tant français qu'européens sur les deux thématiques de la décarbonation et de la digitalisation ont été couronnées de succès, et les collaborations inter-Carnot se sont renforcées (avec Clim'adap, Energies du futur, ou CEA-Leti). Retrouvez, dans ce rapport, la rétrospective d'une année riche : bonne lecture !

* <https://faq-decarbonation-transports.mobicloud.fr/>

Gaëtan Monnier

Directeur du Carnot IFPEN Transports Energie

IFP ENERGIES NOUVELLES



IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, de la mobilité et de l'environnement. Depuis les concepts scientifiques en recherche fondamentale jusqu'aux solutions technologiques en recherche appliquée, l'innovation est au cœur de son action.

Dans le cadre de la mission d'intérêt général confiée par les pouvoirs publics, IFPEN concentre ses efforts sur l'apport de solutions aux défis sociétaux et industriels de l'énergie et du climat, au service de la triple transition écologique, énergétique et numérique. Partie intégrante d'IFPEN, IFP School, son école d'ingénieurs, prépare les générations futures à relever ces défis.

UNE RECHERCHE CENTRÉE SUR L'INNOVATION

Les programmes de R&I d'IFPEN ont pour objectif de lever des verrous scientifiques et technologiques afin de déboucher sur des innovations valorisables par l'industrie.

Face à une large gamme de questionnements scientifiques ouverts, la **recherche fondamentale** d'IFPEN vise à produire un socle transverse de connaissances nouvelles, de concepts et méthodologies, support au développement des innovations de demain.

Les projets sont souvent menés dans un cadre collaboratif avec des partenaires académiques et industriels.

Les chercheurs d'IFPEN apportent régulièrement leur expertise scientifique aux pouvoirs publics, afin de leur fournir des éléments d'éclairage utiles à la décision. Engagé dans de nombreux projets, plateformes technologiques et réseaux dans le cadre d'Horizon Europe, IFPEN contribue également à faire émerger une vision européenne de la recherche dans les domaines de la mobilité et de l'énergie.

Les programmes de **recherche appliquée** sont structurés autour des quatre orientations stratégiques :

- **climat, environnement et économie circulaire** : réduire l'impact des activités humaines et industrielles sur le climat et l'environnement,
- **énergies renouvelables** : produire, à partir de sources renouvelables, de l'énergie, des carburants et des intermédiaires chimiques ;
- **mobilité durable** : développer des solutions pour des transports efficaces et à faible impact environnemental ;
- **hydrocarbures responsables** : répondre à la demande en énergie et en produits chimiques de manière plus respectueuse de l'environnement.

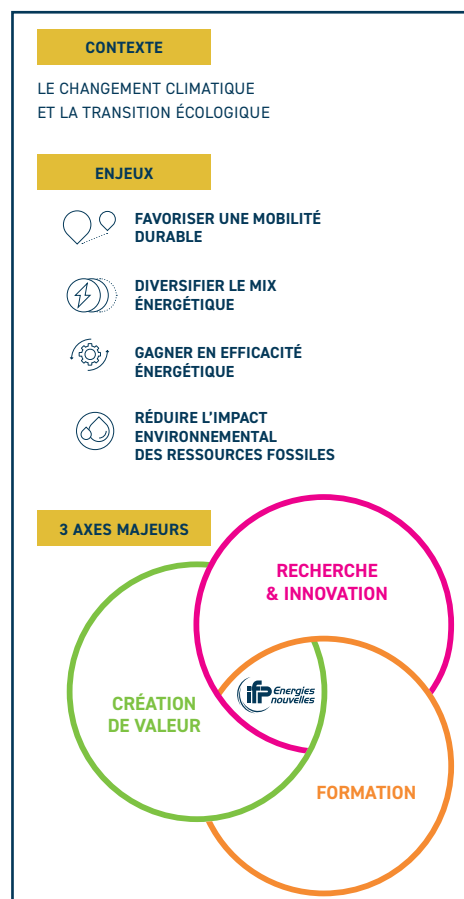
Le financement d'IFPEN est assuré à la fois par le budget de l'État et par des ressources propres provenant des filiales et de partenaires industriels.

LA CRÉATION DE VALEUR

IFPEN contribue à la création de richesse et d'emplois, en favorisant le développement économique des filières liées aux secteurs de la mobilité, de l'énergie et des éco-industries. Le modèle d'IFPEN repose sur la valorisation des innovations développées par ses chercheurs. La mise sur le marché se fait via les filiales de son groupe et au travers de partenariats étroits avec des industriels. Sur des marchés émergents ou matures, IFPEN crée ainsi des sociétés ou prend des participations dans des entreprises prometteuses. Par ailleurs, IFPEN accompagne le développement de start-up et PME dans le cadre d'accords de collaboration leur permettant de bénéficier de son savoir-faire technique et juridique.

LA FORMATION, VECTEUR DE COMPÉTITIVITÉ

Dans le contexte de la transition énergétique, IFP School forme des talents pour relever les défis techniques, économiques et environnementaux, tout en accompagnant les industriels dans leurs besoins en personnel hautement qualifié. Rayonnant à l'international, IFP School propose à de jeunes diplômés des formations de niveau Master pour les métiers d'aujourd'hui et de demain dans les domaines de l'énergie, de l'automobile et de l'environnement. Elle délivre ainsi tous les ans plus de 500 étudiants issus du monde entier.



LE CARNOT IFPEN TRANSPORTS ENERGIE EN BREF



Le Carnot IFPEN Transports Energie est un acteur de la transition énergétique et environnementale vers une mobilité décarbonée et durable. Il propose et développe des solutions innovantes, technologiques et/ou digitales pour l'industrie, les usagers et les décideurs publics, afin d'accroître l'efficacité énergétique et réduire les impacts environnementaux des systèmes de transports. Il accompagne les mutations liées à la transition écologique, énergétique et numérique de la mobilité.

Innover

Des solutions innovantes pour la décarbonation et la digitalisation de la mobilité telles que des :

- machines électriques pour une large gamme de puissance, électronique de pilotage à haut rendement et contrôle associé,
- systèmes électrochimiques de stockage et de production d'énergie (batteries et piles à combustible) et gestion optimale de l'énergie des véhicules,
- propulsion hydrogène et bas carbone (gaz, biogaz) : moteur à combustion optimisé et système de dépollution associé,
- webservices d'analyses énergétique, économique et environnementale du transport individuel et collectif,
- outils de l'ingénierie de conception des systèmes de propulsion afin d'en améliorer l'efficacité énergétique et d'en limiter l'impact environnemental.

Collaborer

- **Des relations privilégiées avec l'industrie** : des start-up, TPE, PME, ETI jusqu'aux grands groupes industriels français et internationaux
- **Un engagement fort au sein de pôles de compétitivité** (NextMove, CARA, etc.)
- **Une synergie avec des réseaux de partenaires** académiques et des laboratoires de R&D au rayonnement international
- **Une présence active au sein d'instances européennes** représentatives de la recherche et de l'industrie (EARPA, ERTRAC, EGVIafor2ZERO, POLIS, CCAM, BEPA).

Valoriser

Un accompagnement des filières industrielles sur un champ très large de niveau de maturités technologiques (TRL 2 à 9)

Un transfert de nos résultats R&D au travers de :

- co-développements de produits avec cession de licence d'exploitation,
- partenariats stratégiques,
- contrats de recherches collaboratives.

Le Carnot IFPEN Transports Energie en 2023, c'est :

56 contrats pour un panel de 33 entreprises

32 projets de recherche collaborative auxquels contribuent 247 entreprises partenaires

Près de 300 personnes impliquées dans les projets

Plus de 40 doctorants

30 brevets déposés dans l'année et 265 détenus dans le portefeuille de brevets

27 publications de rang A

FAITS MARQUANTS 2023

MOTORISATIONS ÉLECTRIQUES

Les travaux du Carnot IFPEN Transports Energie (TE) ont pour but d'améliorer la performance des systèmes de propulsion électrique et notamment leur efficacité énergétique et leur impact environnemental. Des modèles numériques permettent de capitaliser les connaissances et, au travers d'outils d'optimisation multicritères, d'identifier de nouvelles solutions de moteurs, d'électronique de pilotage et de contrôle. De nombreux partenariats industriels alimentent ces recherches, notamment dans le domaine de l'électronique de puissance. Un partenariat avec la PME EREM pour le groupe GCK a notamment permis de valider la performance de nouvelles parties actives (stators et rotors) conçues par le Carnot IFPEN TE. Ces travaux ont été validés pour deux moteurs, le premier en basse tension et forte densité de puissance pour la mobilité légère, et le deuxième à forte tension et puissance continue supérieure à 300 kW pour une application *off-road*. D'autres projets ont démarré en 2023 avec comme partenaires le groupe GCK et sa filiale Solution F, ou la société Mov'Ntec.



FIN DU PROJET MELCHIOR : UN PROTOTYPE DE MOTEUR ÉLECTRIQUE RECYCLABLE

Le projet Melchior*, mené en commun par le Carnot IFPEN TE et le CEA-Liten au travers de son Carnot Énergies du futur de 2022 à 2023, a permis de concevoir une machine électrique innovante à aimants recyclables. Des tensions d'approvisionnement étant attendues dans les prochaines années concernant les matériaux utilisés dans les moteurs électriques (aimant, fer, cuivre et aluminium), Melchior a ciblé des architectures qui minimisent l'utilisation de matériaux critiques et facilitent

le désassemblage et le recyclage des composants sans impacter la performance. Le Carnot IFPEN TE a conçu le moteur et évalué son impact environnemental, alors que le CEA-Liten a mis en œuvre une technologie innovante d'aimants recyclables. Cette activité se poursuit grâce notamment au projet Magellan, piloté par Orano et lancé début 2024, qui vise, grâce à des technologies innovantes de fabrication des aimants permanents (moulage par injection de poudre) et à des améliorations dans la conception de machines électriques, à rendre plus simple et plus propre la séparation des matériaux des moteurs en fin de vie et à optimiser ainsi la récupération des aimants.

* Machines électriques dans une chaîne de valeur orientée vers le recyclage



INTERVIEW DE

Vincent Lallemand, directeur de Solution F (groupe GCK)

Ce qui nous anime aujourd'hui avec le Carnot IFPEN TE, c'est le développement de nouvelles générations de motorisations électriques compactes et à très forte puissance spécifique pour équiper différentes catégories de véhicules, comprenant des modèles de compétition, des voitures particulières, des poids lourds et des véhicules off-road. Dès 2022, nous avons adopté les parties actives - conçues par le Carnot IFPEN TE - utilisant la technologie de moteurs synchro-réductants assistés par aimants, dans le cadre du retrofit électrique de la voiture de collection Lancia Delta HF Intégrale. En 2023, cette technologie a été élargie à des motorisations à très haute tension (800V) pour des dameuses, et en basse tension (48V) pour des véhicules de loisir et pour l'hybridation en retrofit de voitures légères citadines. En particulier, la solution en basse tension s'accompagne d'une licence d'exploitation d'un onduleur développé par le Carnot IFPEN TE, qui assure le pilotage optimal du moteur électrique. Cette solution globale est différenciante et stratégique pour notre groupe. Elle nous permet d'avoir une longueur d'avance dans les technologies de traction électrique destinées soit à du retrofit de véhicules thermiques, soit à la production en petite série de voitures électriques très performantes et haut de gamme.



FOCUS

Le Carnot IFPEN TE a rejoint les Carnot partenaires du projet européen ARCHIMEDES, lancé en juin 2023 dans le cadre d'un partenariat public privé européen, qui vise à augmenter l'efficacité et la durée de vie des composants d'électronique de puissance et des dispositifs de stockage d'énergie dans l'automobile, l'aviation et l'industrie. Le Carnot IFPEN TE participera aux études de fiabilité des matériaux semi-conducteurs à large bande (*Wide Band Gap*) utilisés dans les chargeurs bidirectionnels (V2H) et les onduleurs de traction pour des applications exigeant des niveaux de puissance, de fréquence ou de température élevés.

MOBILITÉ HYDROGÈNE

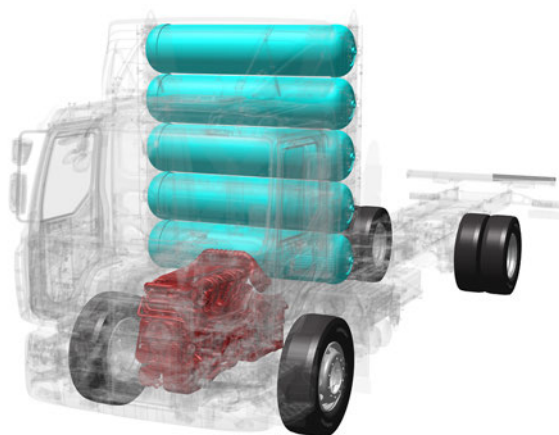
Les motorisations thermiques à hydrogène sont bien adaptées au transport collectif de personnes et aux poids lourds, notamment en raison de leur grande autonomie et leur coût maîtrisé pour une solution zéro émission de CO₂ à l'utilisation. Le Carnot IFPEN TE cherche au travers de l'optimisation du système de combustion à maximiser le rendement énergétique et à minimiser les émissions d'oxyde d'azote (NO_x). Les systèmes de combustion avancés utilisant des carburants bas carbone liquides ou gazeux (gaz naturel, biogaz, hythane) font également l'objet de travaux pour réduire les émissions de CO₂. Enfin, dans le cadre du projet européen PHOENICE, coordonné par le Carnot IFPEN TE, qui s'est achevé en 2023, des essais concluants ont été réalisés sur un moteur thermique équipé d'une culasse Swumble™ et dédié à un véhicule hybride rechargeable hautement efficient et à très faible niveau d'émissions polluantes.

Les simulations numériques 3D des écoulements polyphasiques réactifs turbulents pour l'optimisation des systèmes de combustion sont réalisées avec le logiciel CONVERGE™ qui a été développé depuis 2014 dans le cadre d'un partenariat avec la société Convergent Science Inc. (CSI) et renouvelé sur la période 2023-2027.

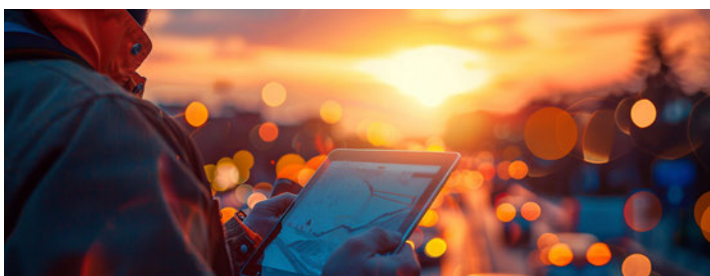


PROJET PLH2 : UNE SOLUTION ÉCONOMIQUE DE DÉCARBONATION POUR LES POIDS LOURDS

Le projet PLH2, impulsé par l'appel à projets CORAM et coordonné par Volvo Group - Renault Trucks avec comme partenaire le Carnot IFPEN TE, a permis de démontrer en 2023, après deux ans de travaux, la possibilité d'équiper les poids lourds de moteurs thermiques à hydrogène dont le coût est comparable à celui de leurs analogues diesels. Le Carnot IFPEN TE s'est chargé de la calibration du moteur 6 cylindres de type MH8. Les calculs 3D de combustion ont été validés par les résultats expérimentaux notamment la pression dans le cylindre, la vitesse de combustion et les transferts thermiques aux parois. De plus, l'influence sur la combustion des paramètres de réglage (phasage de l'injection, richesse, ...) ou géométriques (injecteur hydrogène, bougie, ...) a pu être précisée. Ce moteur très performant est en phase d'évaluation finale sur véhicule par les équipes de Volvo Group - Renault Trucks.



DIGITALISATION DANS LA MOBILITÉ



Pour faire face aux évolutions de la réglementation environnementale dans le domaine du transport et de la mobilité, le Carnot IFPEN Transports Energie (TE) réalise des études d'impact, des analyses de cycle de vie, et développe des outils d'aide à la décision. Ainsi, une étude d'analyse de cycle de vie a été conduite en 2023 à destination de la DGEC concernant les motorisations deux-roues alimentées en bioéthanol. Par ailleurs, le comparateur interactif de l'empreinte environnementale des véhicules hybrides rechargeables (PHEV),

développé de 2021 à 2022 pour le Concauwe, a été étendu en 2023 aux véhicules poids lourds.

Ces études et ces outils ont été rassemblés en 2023 dans une FAQ dédiée à la décarbonation des mobilités, ergonomique et simple d'accès.



R-TAMS : UN OUTIL PRÉCIS ET FIABLE POUR GUIDER LES DÉCISIONS EN MATIÈRE DE QUALITÉ DE L'AIR ET D'ÉMISSIONS POLLUANTES

L'outil R-TAMS* a été développé en 2023 par le Carnot IFPEN TE pour guider les régions en matière de qualité de l'air et d'émissions polluantes liées aux transports. R-TAMS peut être déployé sur n'importe quel territoire, offrant ainsi une solution adaptée au contexte local. R-TAMS fournit en temps réel et avec précision les émissions de polluants du trafic routier, à l'échappement (NO_x , CO_2 , PM) et hors échappement (abrasion des freins et des pneumatiques). R-TAMS mesure aussi en temps réel les niveaux sonores du trafic routier, offrant ainsi une vision globale de l'impact de la mobilité.

**Real Time air quality monitoring system*

FOCUS

ELEMENTS* est un capteur de polluants gazeux basé sur la spectrométrie UV. Cette innovation du Carnot IFPEN TE a été intégrée avec succès à l'analyseur REAL-e, qui mesure les polluants automobiles, et à la Flair box, outil de surveillance environnementale.

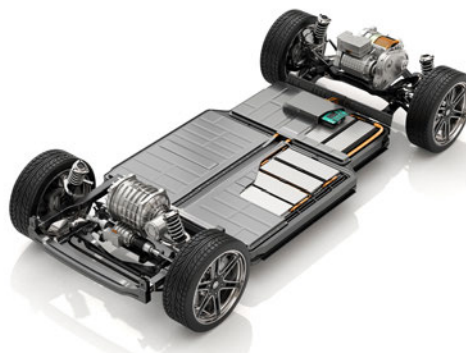
** The Embeddable Emissions MEasurement System*

BATTERIES : OUTILS DE SIMULATION, CONCEPTION, MATÉRIAUX

Les travaux du Carnot IFPEN TE sur les systèmes électrochimiques de stockage ou de production d'électricité (batteries et piles à combustibles) se sont renforcés en 2023. Objectif : améliorer l'autonomie et le temps de recharge en énergie, ainsi que la sûreté de fonctionnement, la durabilité et l'efficacité énergétique, tout en comprimant les coûts.

Dans le domaine des batteries, les enjeux concernent le vieillissement et l'emballage thermique, sur les technologies existantes à électrolyte liquide, ou futures, de type tout-solide. De nouveaux matériaux sont à l'étude, avec une plus grande densité énergétique massique et volumique, et une sécurité et une durabilité améliorées. La simulation système est réalisée sur la plateforme Simcenter Amesim, dont le module ESS pour les batteries est codéveloppé par le Carnot IFPEN TE et Siemens Digital Industries Software dans le cadre d'un contrat de collaboration renouvelé en 2023 pour six ans.

Dans le domaine des piles à combustibles (PàC), la durée de vie est aussi un enjeu majeur. Des expérimentations et des modélisations ont permis d'affiner la compréhension des phénomènes de vieillissement. La durabilité des PàC a été améliorée grâce notamment aux progrès réalisés sur l'électronique de pilotage. Ces avancées ont été conçues dans le cadre de projets collaboratifs, comme le projet ECH₂ (Électronique de Contrôle pour véhicules à Hydrogène), porté par la société Vitesco Technologies et soutenu par le CORAM, ou encore le projet HYSYSPEM du PEPR H₂, piloté par le CEA-Liten, qui vise à optimiser les systèmes de production d'électricité utilisant une pile à combustible hybridée à des stockages électrochimiques pour les applications de mobilité de forte puissance (camion, navire, train, avion).



MODALIS²

En route vers les batteries du futur

Le projet européen MODALIS^{2*}, coordonné par le Carnot IFPEN TE et mené avec neuf autres partenaires, s'est achevé en 2023 par l'obtention d'excellents résultats sur la simulation des batteries Gen 3b (à base de nouveaux matériaux tels que des alliages avec du silicium pour les électrodes négatives) et Gen 4b (électrolytes solides).

Le nouveau projet HELENA**, lancé en 2023 et piloté par le laboratoire espagnol CIC EnergyGUNE, permet de poursuivre les travaux de recherche sur cette thématique, avec le développement d'une nouvelle cellule de batterie à l'état solide à haute efficacité énergétique et densité de puissance, basée sur une cathode NMC, riche en Ni, à haute capacité, une anode Li métal (LiM) à haute énergie et un halogénure super-ionique Li-ion comme électrolyte solide, proposé par Saint Gobain. Le Carnot IFPEN TE est responsable de l'activité transverse de modélisation.

Le Carnot IFPEN TE s'implique dans d'autres projets sur ces thématiques. Certains sont européens comme BATSS, qui vise à renforcer la recyclabilité des batteries grâce à une conception modulaire et à un assemblage et démontage plus facile des différents éléments ou BatCAT, dédié au développement d'un jumeau numérique pour la fabrication de batteries. Le projet SONIC, mené dans le cadre national du PEPR « Batteries » par quatre partenaires dont le Carnot IFPEN TE, a pour but de produire des matériaux d'électrodes organiques de « type p » à base de thiophène innovants, durables et compatibles avec des électrolytes polymères à conduction anionique.

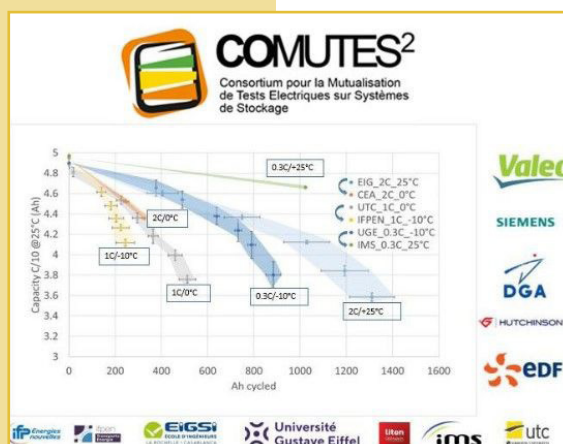
* Modelling of Advanced LI Storage Systems

** Halide solid state batteries for Electric Vehicles and Aircrafts

COMUTES² : DES BATTERIES SOUMISES À DES TESTS DE VIELLISSEMENT

COMUTES² (Consortium pour la Mutualisation de Tests Electriques sur Systèmes de Stockage) a démarré en mars 2023 une nouvelle campagne de tests de vieillissement de batteries pour le compte de cinq adhérents : Plastic Omnium, TotalEnergies, EDF, la DGA et Arts Energy. Cette seconde campagne, qui concerne les batteries Li-ion LFP/C de format prismatique, poursuit l'objectif initial du consortium qui est de partager les moyens expérimentaux, les coûts et les données de tests issus de six laboratoires français (IFPEN, UGE, CEA, IMS, EIGSI et UTC).

La connaissance approfondie du comportement des batteries (qui contribuent en moyenne pour 30 % au coût d'un véhicule électrique) et l'estimation de leur durée de vie permettront à la mobilité électrique de se déployer plus rapidement.



INOCEL S'APPUIE SUR LE CARNOT IFPEN TE POUR LA CAMPAGNE D'ESSAIS DE SA PILE À COMBUSTIBLE



Le Carnot IFPEN TE a conclu un partenariat stratégique avec INOCEL, spécialisé dans le développement de piles à combustible de forte puissance, pour mener une campagne d'essais permettant de tester et valider son système pile à combustible INOCEL Z300. Les installations de forte puissance du Carnot IFPEN TE ont été exploitées par INOCEL pour réaliser une expertise approfondie du système dans son ensemble et d'optimiser les performances de sa technologie.

« Cette étape est une avancée significative pour INOCEL, marquée par la première sortie du système hors de l'environnement bureau d'études. Nous sommes déterminés à relever tous les défis qui nous permettront de maximiser les performances et la fiabilité de notre pile à combustible. »

témoigne **Marie-Laure Michaux**,
directrice technique d'INOCEL

ACTIONS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET DE PROFESSIONNALISATION

L'abondement Carnot offre au Carnot IFPEN TE l'opportunité d'accélérer le développement ou l'adaptation de ses compétences pour faire face à l'évolution des besoins du marché. De plus, engagé auprès de nombreux acteurs industriels (TPE, PME, ETI et GE), le Carnot IFPEN TE les accompagne, au travers d'actions de recherche partenariale, dans leurs programmes R&D ou codéveloppe avec eux des produits et services répondant aux besoins de la mobilité durable.



Innovations en refroidissement pour semi-conducteurs wide band gap dans l'électronique de puissance

Depuis les dix dernières années, l'arrivée sur le marché des semiconducteurs wide band gap (WBG) a apporté une rupture technologique en électronique de puissance, grâce à leurs propriétés intrinsèques (vitesse de commutation, faibles pertes, densité de puissance accrue) surpassant celles des composants à base de silicium (MOSFETs Si ou IGBTs). Cependant, exploiter pleinement le potentiel de ces composants pose des défis technologiques et scientifiques, notamment en raison des pertes produites sur des surfaces très réduites, atteignant des densités de pertes de l'ordre de 1 kW/cm².

L'étude menée par le Carnot IFPEN Transports Energie a exploré une stratégie de refroidissement innovante pour l'électronique de puissance, basée sur le contact direct des composants WBG avec un fluide diélectrique. Cette démarche a consisté à réaliser une carte de puissance compatible avec les applications de transports électriques, immergée dans un fluide pour évaluer la compatibilité de l'huile avec l'électronique et, surtout, sa capacité à extraire les pertes générées par les composants dans des conditions représentatives (haute tension, hautes fréquences et vitesse de commutation).

La pertinence de ce principe de refroidissement a été validée en comparant ses performances avec celles d'un refroidissement conventionnel par convection naturelle à air.



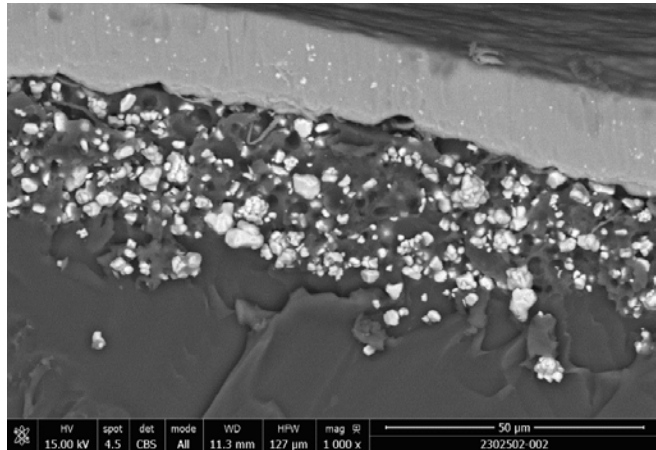
Carte de puissance à base de composants WBG en fonctionnement représentatif immergée dans un bain d'huile diélectrique.



Développement de catholytes polymères pour les batteries tout solide

Les catholytes de batterie tout solide à base de polymères sont développés pour résoudre le problème de la percolation ionique dans la cathode en l'absence d'électrolyte liquide, tout en assurant une bonne cohésion aux interfaces. Les travaux menés en 2023 ont démontré la faisabilité d'électrolytes solides polymères utilisant la réaction click thiol-ène. L'avantage de ce système est l'emploi de précurseurs peu coûteux et liquides, permettant une polymérisation et une réticulation in situ, compatibles avec le processus de fabrication actuel des batteries.

Des catholytes polymères réticulés ont été intégrés dans des cathodes de batteries lithium métal tout solide, en imprégnant les cathodes avec les précurseurs du polymère. Ces travaux ont permis d'une part de mettre en évidence l'importance de maîtriser les processus de préparation de l'électrode pour assurer une imprégnation efficace de la porosité de l'électrode et d'autre part d'améliorer notre compréhension des interfaces entre le polymère et les matériaux de cathode. Les résultats obtenus sur des cathodes à base de LFP sont prometteurs. Cependant, l'interface entre le catholyte polymère et la matière active NMC nécessite encore des travaux de recherche pour améliorer les performances en cyclage.



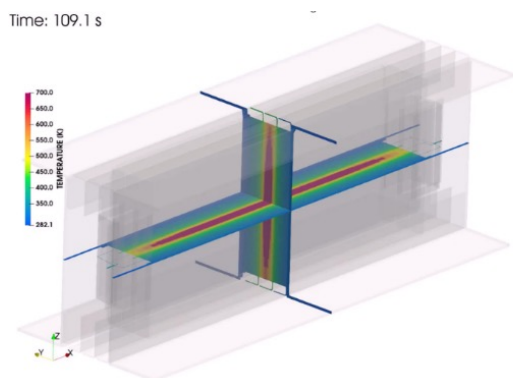
Aide à la conception et à la gestion du pack batterie

L'électrification des transports connaît une forte croissance en France et en Europe, avec l'implantation de nouvelles filières de production de batteries. Cette expansion rapide s'accompagne d'une évolution technologique accélérée, entraînant une diversité accrue des technologies de batteries, chacune ayant ses contraintes spécifiques d'utilisation et de gestion.

En 2023, des actions ont été menées pour mettre en place et évaluer une méthodologie de simulation rapide et efficace, couplant des approches de modélisation 1D et 3D, afin d'évaluer les aspects thermiques et de sécurité des nouvelles technologies de batteries. La méthodologie adoptée combine une première étape de modélisation et de calibration des phénomènes d'emballage thermique en 1D avec le logiciel Simcenter Amesim, suivie par une étape de développement CFD 3D sous le logiciel Converge.

L'utilisation d'Amesim permet de bénéficier de 15 ans d'expertise en matière de batteries et d'obtenir des temps de calcul très rapides. Le passage à Converge permet de tirer parti des compétences historiques des équipes du Carnot IFPEN Transports

Énergie en thermique et combustion, et de mieux appréhender les phénomènes complexes liés à la thermique au sein d'un pack batterie dans des approches 3D. Les travaux se poursuivent pour mieux prendre en compte les gaz extraits par mise en dépression de la zone non saturée (en anglais « venting ») et leur combustion pendant la phase d'emballage.



Simulation de la propagation de l'emballage thermique de cellules de batteries Li-ion de format pouch au sein d'un cluster de 3 cellules en parallèle.



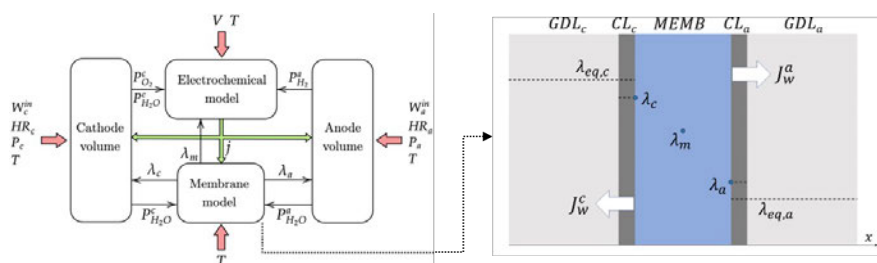
Développement et optimisation des méthodes de caractérisation et de commande de systèmes de pile à combustible

Le contrôle précis des paramètres de fonctionnement d'un système de pile à combustible (PàC) est essentiel pour assurer sa durabilité. En l'absence d'un bon contrôle, la pile peut vieillir rapidement, affectant le véhicule par des pertes de performances et d'autonomie, ainsi qu'une augmentation des besoins en refroidissement. La compréhension détaillée des phénomènes électrochimiques et thermiques au cœur de la pile, ainsi que le développement d'algorithmes de commande pour les acteurs des circuits d'air, d'hydrogène et de liquide de refroidissement, sont deux aspects cruciaux.

En 2023, le Carnot IFPEN Transports Énergie a poursuivi le développement de modèles numériques permettant d'évaluer l'état de la pile et d'optimiser son alimentation en air comprimé. Cela inclut :

- 1) La modélisation des échanges thermiques : simulation des échanges thermiques dans le milieu et du transport des espèces gazeuses et de l'eau liquide à proximité immédiate de la membrane échangeuse de protons.
- 2) L'optimisation de l'alimentation en air : modélisation des besoins en air, y compris la pression optimale à la cathode et la stœchiométrie.

En termes de contrôle-commande, le Carnot a développé des algorithmes basés sur des modèles numériques pour gérer le circuit d'air, incluant un estimateur d'humidité de la membrane. Ce pilotage vise à accroître le rendement de la pile tout en préservant sa durabilité.



Principe pour la modélisation du contenu en eau de la membrane échangeuse de protons (extrait de : Adaptive Extended Kalman Filter for PEMFC Membrane Water Content Estimation, G. Lance, T. Leroy and J. Sery)



Placement optimal des infrastructures de recharge pour véhicules électriques

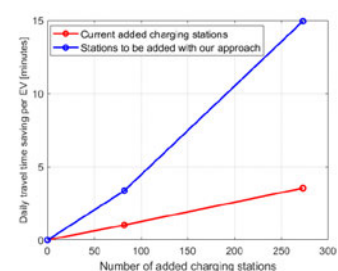
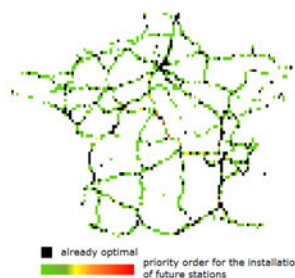
La méconnaissance de la consommation des véhicules électriques en usage réel et la disponibilité limitée de stations de recharge représentent deux freins majeurs à l'adoption massive des véhicules électriques. Ce projet a permis de développer une méthode pour déterminer l'emplacement optimal des infrastructures de recharge sur le territoire national, afin de réduire « l'angoisse de l'autonomie » et de maximiser le taux de faisabilité des trajets longue distance.

En s'appuyant sur des données de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE), les flux moyens journaliers de déplacements entre les 60 villes françaises les plus peuplées et avec la plus grande capacité hôtelière ont été analysés. Cela a permis de créer un réseau de 3600 paires origines-destinations (O-D) représentatives des besoins réels de mobilité.

Un calculateur d'itinéraire pour véhicules électriques, développé par le Carnot IFPEN Transports Énergie, visant à minimiser les temps de trajet et la consommation énergétique, a été utilisé pour identifier les endroits du réseau autoroutier français où les besoins en énergie sont les plus importants. Des méthodes de regroupement ont ensuite été employées pour déterminer les emplacements des bornes de recharge ayant le plus d'impact sur la mobilité électrique.

Les résultats montrent des gains considérables en termes de coûts d'installation tout en maintenant les mêmes performances en temps de trajet.

L'outil permet d'identifier sur le territoire national les stations déjà optimales ainsi que les prochains emplacements à prioriser pour l'installation de nouvelles bornes (à gauche). Un placement selon cette priorisation permettrait d'accroître les gains en temps de trajet des utilisateurs avec moins de nouvelles stations par rapport à la stratégie actuelle (à droite).





Indicateurs de mobilité : suivi et analyse au service des territoires

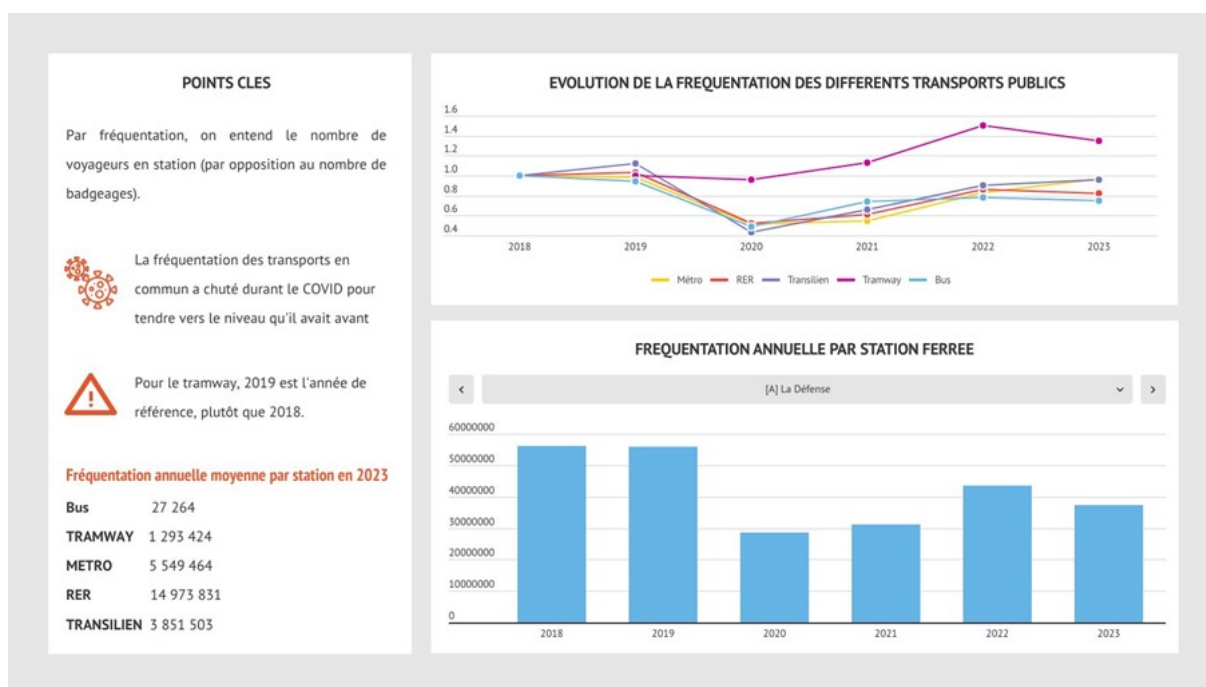
La demande de mobilité évolue avec le changement des modes de travail et la diversification des modes de transport. Il est crucial de suivre cette évolution pour comprendre les besoins de déplacement, orienter vers des mobilités vertueuses et quantifier l'impact des modifications d'infrastructures sur l'empreinte carbone d'un territoire. Les données de mobilité, recueillies via des outils numériques, sont abondantes et hétérogènes. Il est nécessaire de les nettoyer, de les coupler à l'aide de la modélisation (jumeau numérique) et de définir des indicateurs agrégés pour en extraire une meilleure compréhension.

En 2023, en collaboration avec le Carnot Clim-Adapt, les travaux ont visé à définir des indicateurs de suivi de la mobilité et de l'empreinte carbone associée à l'échelle d'un territoire.

Les résultats incluent :

- une compilation des indicateurs existants et leur pertinence pour le suivi de la mobilité ;
- des outils pour visualiser les indicateurs appliqués à un territoire ;
- un modèle intégratif des indicateurs et leurs interconnexions ;
- une méthodologie pour l'apprentissage des séries temporelles des indicateurs ;
- et un algorithme pour détecter les ruptures dans l'évolution de la mobilité.

Ces outils et méthodes robustes facilitent le suivi des tendances de mobilité et leur impact environnemental, enrichissant ainsi le portefeuille d'applications et webservices développés par le Carnot IFPEN TE pour les territoires.



UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

Dans le cadre de leurs travaux de recherche, les équipes du Carnot IFPEN Transports Energie sont engagées dans plusieurs projets nationaux et européens avec de nombreux acteurs académiques et industriels. Elles contribuent ainsi au développement de la R&I européenne pour une mobilité durable. Panorama des projets dans lesquels le Carnot IFPEN TE était engagé en 2023.

MOBILITÉ HYDROGÈNE ET PÀC		
NOM DU PROJET	TITRE DU PROJET	FINANCEUR
H2D2	Briques technologiques et démonstrateurs hydrogène	ADEME
SMAC-FC	Briques et démonstrateur hydrogène	
HYSyPEM (PEPR H2 Décarboné)	Optimisation de systèmes d'Énergie hybride avec des systèmes pile PEM multi-sack pour applications transport lourd	ANR
HYMOT	Moteur à hydrogène	Bpifrance
ECH2	Électronique de contrôle (HW/SW) modularité et durabilité pour les véhicules à piles à combustible	
PROPULSION ÉLECTRIQUE		
NOM DU PROJET	TITRE DU PROJET	FINANCEUR
REdHaT motor	Moteurs électriques fiables et à forts couple et puissance massiques	ANR
MITIC	<i>Modeling of Direct Liquid Cooling of Electric Motors</i> Modélisation du refroidissement direct par liquide des moteurs électriques	
MAUTIV'8	<i>Multipurpose AUtomotive Traction InVerter 800V</i> InVertiseur de traction automobile polyvalent 800V	Bpifrance
OLEA-EVO	Optimisation du rendement des véhicules électriques	Commission européenne
NOUVEAU EMPOWER	<i>Modular multi-powertrain zero-emission systems for HDV (BEV and FCEV) for efficient and economic operation</i> Systèmes modulaires à groupe motopropulseur zéro émission pour les VLD (BEV et FCEV) pour un fonctionnement efficace et économique	
NOUVEAU ARCHIMEDES	<i>Trusted lifetime in operation for a circular economy</i> Une durée de vie fiable pour une économie circulaire	
BATTERIES		
NOM DU PROJET	TITRE DU PROJET	FINANCEUR
Micro-Q-Li	Microscopie LIBS Quantitative du Lithium	ANR
NOUVEAU SONIC (PEPR BATTERIES)	Batterie organique anionique tout solide	
AuraNode	Mise à échelle d'un procédé de production de matériaux d'anode de batteries lithium-ion Gen3b, à base d'un composite Carbone - nanofils de silicium	Bpifrance
HELENA	<i>Halide solid state batteries for ELectric vEHicles aNd Aircrafts</i> Batteries solides aux halogénures pour les véhicules électriques et les avions	Commission européenne
NOUVEAU BATSS	<i>Safe efficient battery system based on advanced cell technology</i> Système de batterie sûr et efficace basé sur une technologie cellulaire avancée	

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DE LA MOBILITÉ		
NOM DU PROJET	TITRE DU PROJET	FINANCEUR
NOUVEAU SESAME REVO	Surveillance des émissions : apports de la mesure embarquée lors du reconditionnement des véhicules d'occasion	ADEME
MOUVEMENT	Mesurer et optimiser les usages des véhicules électrifiés et leurs impacts sur l'environnement via les nouvelles technologies	
NOUVEAU CROISI'Air et EXTREME DEFFI	Evaluation de l'exposition des passagers et des riverains aux émissions de polluants liés à la production d'énergie des ferries - Étude des solutions de mitigation et perspectives associées	
NOUVEAU FORBAC (PEPR MOBIDEC)	Prévoir les impacts de la mobilité, « rétrovoir » les décisions optimales	ANR
NOUVEAU MOB SCI-DAT FACTORY (PEPR MOBIDEC)	Partage d'outils de traitement et d'analyse des données de mobilité	
Cp4sc	Cloud Platform For Smart City Consortium Plate-forme Cloud pour le consortium Smart City	Bpifrance
NOUVEAU Transensus	<i>Towards a European-wide harmonised transport-specific LCA approach</i> Vers une approche ACV harmonisée à l'échelle européenne pour les transports	Commission européenne
MAGPIE	<i>sMArt Green Ports as Integrated Efficient multimodal hubs</i> Les ports verts smart, des pôles multimodaux intégrés et efficaces	
OLGA	Olympics & Green Airports Aéroports verts	
NOUVEAU ELABORATOR	<i>The european living lab on designing sustainable urban mobility towards climate neutral</i> Laboratoire vivant européen sur la conception d'une mobilité urbaine durable pour la neutralité climatique	
NOUVEAU UPPER	<i>Unleashing the potential of public transport in Europe</i> Libérer le potentiel des transports publics en Europe	
LENS	<i>L-vehicles Emissions and Noise mitigation Solutions</i> Solutions pour la réduction des émissions et du bruit des véhicules L	
NOUVEAU XL CONNECT	<i>Large scale system approach for advanced charging solutions</i> Approche systémique à grande échelle pour des solutions de recharge avancées	
PROPULSION BAS-CARBONE		
NOM DU PROJET	TITRE DU PROJET	FINANCEUR
Ofelie	<i>Oxygenated FuELs impact on spark Ignition engine Emissions</i> Impact des carburants oxygénés sur les émissions des moteurs à allumage commandé	ANR
LONGRUN	<i>Development of efficient and environmental friendly LONG distance powertrain for heavy dUty trucks aNd coaches</i> Développement d'un groupe motopropulseur efficace et respectueux de l'environnement pour les poids lourds et les autocars	Commission européenne
PHOENICE	<i>Phev towards zero EmissioNs & ultimate ICE efficiency</i> Vers des émissions nulles et l'efficacité maximale des moteurs à combustion interne	

SALONS ET MANIFESTATIONS 2023

1-2 février 2023 - Paris

Hyvolution



22-24 mai 2023 - Lisbonne

ITS Europe



14-15 juin 2023 - Port-Marly

SIA powertrain



4 juillet - Lyon

Journée électronique de puissance by CARA



16-17 octobre - Paris

EARPA Forum

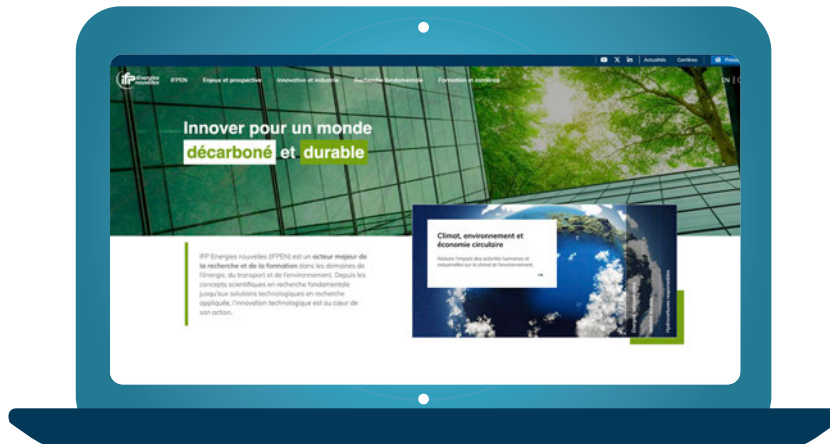


18-19 octobre - Lyon

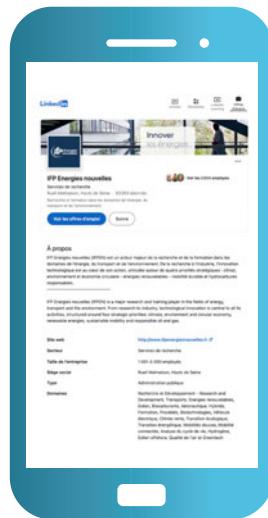
RDV Carnot



Pour suivre l'actualité du Carnot IFPEN TE



Rendez-vous sur le site
www.ifpennergiesnouvelles.fr



Et abonnez-vous
à sa page **LinkedIn**



NOS ÉTABLISSEMENTS

RUEIL-MALMAISON

1 et 4, avenue de Bois-Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex - France

LYON

Rond-point de l'échangeur de Solaize
BP 3 - 69360 Solaize - France

Contact : Gaëtan Monnier

+33 1 47 52 69 16 - gaetan.monnier@ifpen.fr

Maquette : IFPEN

Mise en page : ExeAtelierTypao

Photos : © Adobe Stock, IFPEN, X. - 0624



RAPPORT D'ACTIVITÉ

2023

INNOVER
LA MOBILITÉ

