

CARNOT IFPEN TRANSPORTS ÉNERGIE

2024

INNOVER POUR
UNE MOBILITÉ
DÉCARBONÉE
ET DURABLE



SOMMAIRE

- 4 QUI SOMMES-NOUS ?
IFPEN, UN ACTEUR ENGAGÉ
- 6 CARNOT TRANSPORTS ÉNERGIE EN BREF
UN ACTEUR DE LA TRANSITION ÉNERGETIQUE
ET ENVIRONNEMENTALE
- 8 FAITS MARQUANTS
- 12 GRAND ANGLE
INNOVATIONS EN ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE
POUR LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE ET HYDROGÈNE
- 14 MOBILITÉ ÉLECTRIFIÉE
MACHINES ÉLECTRIQUES INNOVANTES
ÉLECTROLYTES SULFURES POUR BATTERIES TOUT-SOLIDE
AMÉLIORATION DE LA DURÉE DE VIE DES BATTERIES
- 17 MOBILITÉ CONNECTÉE
PLATEFORME D'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE
DES TRANSPORTS
- 18 UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

ANTICIPER LES TRANSFORMATIONS À VENIR

« Dans un contexte où la transition énergétique et écologique du secteur des transports s'impose comme une priorité, le Carnot IFPEN Transports Énergie (TE) poursuit son engagement aux côtés des acteurs publics, industriels et territoriaux pour construire les mobilités de demain.

En 2024, le Carnot IFPEN TE a renforcé son action pour répondre aux besoins croissants des territoires, notamment dans le cadre de la mise en œuvre des zones à faibles émissions et de l'amélioration de la qualité de l'air dans les grandes agglomérations. Grâce à des études prospectives mêlant simulation, données hétérogènes et analyses de cycle de vie (ACV), il apporte une vision complète et dynamique des enjeux environnementaux, appuyée par des outils digitaux accessibles sous forme de webservices.

L'électrification reste au cœur des efforts de décarbonation. En 2024, le Carnot a poursuivi le développement de solutions innovantes

119 MT CO₂

En 2024, le secteur des transports représentait environ 32 % des émissions totales de gaz à effet de serre en France.

Plus précisément, le transport routier est responsable de 119 Mt CO₂.



Gaëtan Monnier,
directeur du Carnot IFPEN
Transports Énergie

adaptées à l'ensemble des segments de mobilité : de l'automobile au transport lourd, en passant par les marchés fluvial, off-road ou encore la mobilité douce. Les travaux de conception d'un moteur électrique basse tension à forte puissance ont été finalisés. Ces avancées s'inscrivent dans une stratégie globale d'optimisation énergétique des systèmes de propulsion, incluant le pilotage de l'électronique de puissance et le contrôle de machines couvrant une large gamme de puissances (de 2 à 500 kW).

Les batteries constituent un autre pilier d'innovation. IFPEN s'est fortement mobilisé en 2024 sur des projets collaboratifs axés sur les nouveaux matériaux, la sécurité, le vieillissement et le recyclage des batteries. Une attention particulière a été portée à la mise au point de méthodes de test et de tri ultra-rapides pour permettre une réutilisation efficace des cellules en seconde vie.

À travers ses recherches, le Carnot IFPEN Transports Énergie continue d'anticiper les transformations du secteur et de proposer des solutions concrètes pour une mobilité sobre, durable et résiliente. Ce rapport illustre la richesse des actions menées tout au long de l'année : bonne lecture !

UN ACTEUR ENGAGÉ POUR UN MONDE DÉCARBONÉ ET DURABLE

IFPEN est l'Institut national pour la recherche et innovation et la formation en énergie, mobilité et environnement. Ses équipes innovent pour un monde décarboné et durable, depuis les concepts scientifiques jusqu'aux solutions concrètes pour l'industrie. Procédés, équipements, produits, logiciels ou services : ses innovations bas-carbone posent les jalons de la transition énergétique et écologique, et facilitent l'émergence de filières industrielles d'avenir.

Face à l'urgence climatique, IFPEN se positionne comme un acteur clé de la transition écologique, énergétique et numérique. Son ambition : développer et démontrer des technologies innovantes, responsables et abordables, pour répondre aux défis de la décarbonation, tout en accompagnant la réindustrialisation et la souveraineté énergétique de la France et de l'Europe. Tiers de confiance, IFPEN apporte son expertise scientifique et technique aux pouvoirs publics nationaux et européens pour l'élaboration de leurs stratégies.



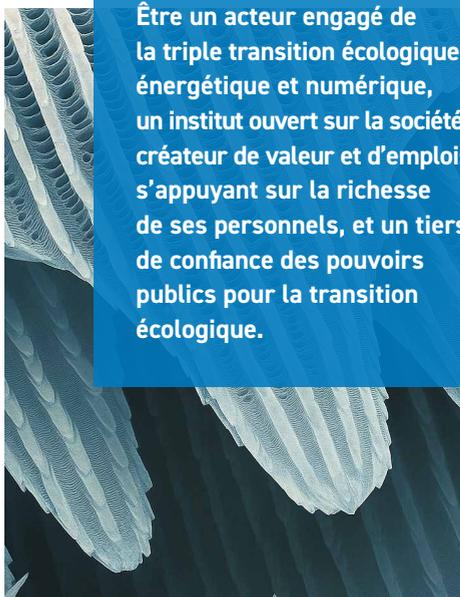
UNE AMBITION

Être un acteur engagé de la triple transition écologique, énergétique et numérique, un institut ouvert sur la société, créateur de valeur et d'emplois, s'appuyant sur la richesse de ses personnels, et un tiers de confiance des pouvoirs publics pour la transition écologique.

UNE RECHERCHE ET UNE INNOVATION AU SERVICE DE L'INDUSTRIE

Couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur, de la recherche fondamentale à la valorisation industrielle, les moyens d'IFPEN permettent d'assurer les différents changements d'échelle et combinent :

- **des outils expérimentaux de pointe**, des laboratoires aux pilotes préindustriels ;
- **une expertise en simulation numérique** et **une analyse de données haute performance** ;
- **des analyses de cycle de vie** ;
- **une stratégie de partenariats** avec des industriels, des start-up et des institutions académiques.



DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES AU SERVICE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET ÉCOLOGIQUE

IFPEN intervient sur des thématiques stratégiques.

PRODUCTION D'ÉNERGIE DÉCARBONÉE :

éolien, hydrogène naturel et stockage d'hydrogène, géothermie, stockage massif d'énergie.

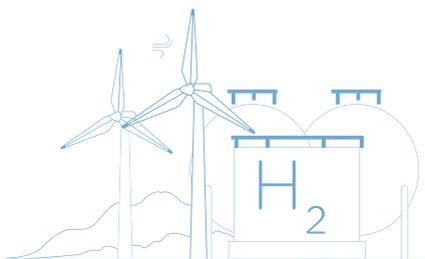
MOBILITÉ DURABLE :

propulsion électrique (machines électriques, électronique de puissance et batteries) et hydrogène (moteur thermique et pile à combustible), carburants durables (biocarburants avancés et carburants de synthèse).

DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE & ÉCONOMIE CIRCULAIRE :

captage, stockage et valorisation du CO₂, recyclage avancé des plastiques et recyclage des métaux, bioproduits, gestion des ressources eau/air/sol.

IFPEN développe ces solutions innovantes en intégrant des analyses environnementales et de cycle de vie, ainsi qu'une approche systémique pour garantir leur viabilité technique, environnementale, économique et sociétale.



IFPEN, moteur de l'innovation et de la transition énergétique et écologique imagine avec audace et conçoit avec rigueur les solutions pour la société de demain.

DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE À LA CRÉATION DE VALEUR

L'expertise d'IFPEN et sa faculté d'innovation se fondent sur un programme de recherche fondamentale qui bénéficie de fortes collaborations avec d'autres institutions. Ses équipes préparent le futur en apportant le socle de connaissances, de compétences, de méthodes et d'outils nécessaires au développement de nouvelles technologies innovantes.

IFPEN participe activement à la création de richesse et d'emplois en stimulant le développement économique des filières liées à la mobilité, à l'énergie et aux éco-industries. Son modèle repose sur la valorisation des innovations issues de la recherche, qui sont mises sur le marché *via* les filiales du groupe et à travers des partenariats étroits avec l'industrie.

Qu'il s'agisse de marchés émergents ou matures, IFPEN crée des entreprises ou prend des participations dans des sociétés prometteuses. Par ailleurs, il accompagne le développement

des start-up et PME grâce à des accords de collaboration leur offrant un accès privilégié à son expertise technique et juridique.

FORMER LES TALENTS DE DEMAIN

Enfin, IFP School, école de spécialisation pour ingénieurs d'IFPEN, joue un rôle essentiel dans la préparation des futures générations et la formation des futurs professionnels qui mettront en œuvre la transition énergétique.

Chaque année, plus de 500 étudiants du monde entier y sont formés aux métiers de l'énergie, de la mobilité et de l'environnement, avec une approche centrée sur l'innovation et l'adaptabilité aux grands enjeux de la transition.



CARNOT IFPEN TRANSPORTS ÉNERGIE

Le Carnot IFPEN Transports Énergie 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)
- 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.

30



PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIVE

en 2024 auxquels contribuent

près de

250

ENTREPRISES
PARTENAIRES



300

PERSONNES
IMPLIQUÉES
DANS
LES PROJETS

Plus de

40



DOCTORANTS

BREVETS

21

BREVETS DÉPOSÉS
DANS L'ANNÉE



et 279

DÉTENUS DANS LE PORTEFEUILLE
DE BREVETS

63



CONTRATS
EN 2024

pour un panel de

31 ENTREPRISES

29

PUBLICATIONS
DE RANG A



JANVIER

LANCEMENT DU PROJET BATSS :
LA RECHERCHE EUROPÉENNE
SUR LES BATTERIES S'INTENSIFIE



Le projet européen BATSS (*Safe efficient BATtery SyStem based on advanced cell technology*), qui vise à faire progresser l'expertise dans les technologies des systèmes de batteries, a démarré. Les travaux du Carnot concerneront notamment la caractérisation électrochimique et thermique de la cellule, la modélisation et la simulation paramétrique 1D, la simulation 3D (propagation des gaz), les essais de vieillissement, ainsi que l'analyse du cycle de vie (LCA) et la détermination du coût de cycle de vie (LCC) du pack batterie.

MOBILITÉ EUROPÉENNE ET ÉCONOMIE
CIRCULAIRE : DES AIMANTS ET DES MOTEURS
ÉLECTRIQUES ENTIÈREMENT RECYCLABLES

Le projet européen MAGELLAN (*MAGnets in rEsiLient supplY chAiNs*), piloté par Orano, a été lancé. Il vise à mettre au point à une échelle industrielle des procédés de traitement des aimants qui permettront d'obtenir des poudres réutilisables pour fabriquer de nouveaux aimants.

Les équipes du Carnot interviendront notamment sur l'éco-conception du moteur, la définition et la qualification des aimants, et enfin sur la validation au banc d'essais du moteur éco-conçu intégrant la nouvelle génération d'aimants issus du recyclage.



FÉVRIER

LA MOBILITÉ HYDROGÈNE À HYVOLUTION



Du 30 janvier au 1^{er} février s'est tenu Hyvolution, le rendez-vous européen incontournable des acteurs de la filière hydrogène. Parmi les thématiques mises en avant figurait le développement de la mobilité hydrogène, à travers deux grands axes : l'utilisation de l'hydrogène dans des piles à combustible et son emploi direct comme carburant.

CONFÉRENCE SIA SUR LES MOTEURS ÉLECTRIQUES : QUELLES SERONT LES TECHNOLOGIES DE DEMAIN ?



La Société des ingénieurs de l'automobile a organisé une conférence intitulée « Moteurs électriques, quelle technologie pour quel usage ? ». Les intervenants du Carnot ont insisté lors de leurs interventions sur le rôle que doit jouer l'électrification des transports pour répondre aux objectifs du « Green Deal ».

MARS

LANCEMENT DU PROJET CROISI'Air POUR L'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR SUR LES FERRIES ET DANS LES VILLES PORTUAIRES

Le projet CROISI'Air, porté par le Carnot IFPEN TE et lauréat de l'appel à projet AQACIA 2022 de l'ADEME, a pour ambition d'améliorer la qualité de l'air sur les ferries et dans les villes portuaires. Pour cela, les équipes du Carnot travailleront en partenariat avec un consortium constitué de la CORSICA linea et d'ATMOSud. Les émissions des navires seront caractérisées à la source, au niveau des passagers et au niveau des riverains *via* des moyens de mesure innovants.



En 2024, les études socio-économiques se sont diversifiées, notamment dans le domaine maritime. La constitution d'une plate-forme d'études économiques et environnementales a permis la standardisation dans la production des résultats. L'année 2024 a vu le développement de la plate-forme R-TAMS de monitoring de la qualité de l'air liée aux transports routiers. Cette plate-forme est également le réceptacle des résultats des deux projets européens OLGA pour les aéroports et MAGPIE sur les ports. Enfin, une étude d'évaluation des émissions polluantes des poids lourds selon les différentes technologies de groupes motopropulseurs et de carburants confiée à IFPEN par le Ministère de la Transition écologique a été réalisée.

AVRIL

PROJET HELENA : DES CELLULES DE BATTERIE À L'ÉTAT SOLIDE QUI TIENNENT LEURS PROMESSES



Après 20 mois d'efforts de développement, le consortium européen HELENA est parvenu à mettre au point une cellule de batterie à l'état solide à base d'halogénure

qui possède les propriétés électrochimiques attendues pour permettre à cette technologie de prendre une place majeure dans la décarbonation de la mobilité terrestre et aérienne.

CONGRÈS TRA 2024 : LE CARNOT IFPEN TE SE JOINT AU GRAND RENDEZ-VOUS DE LA RECHERCHE EUROPÉENNE SUR LES TRANSPORTS



Lors de la conférence *Transport research arena* (TRA), le Carnot IFPEN Transports Énergie a tenu un stand pour présenter ses réalisations et ses savoir-faire sur la décarbonation et la digitalisation des mobilités. Trois volets de la mobilité électrique ont été mis en avant : prédiction et tests de vieillissement et d'emballage thermique pour les futures technologies de batteries, éco-conception de moteurs électriques économes en terres rares et recyclables, conception d'électronique de puissance de forte densité de puissance et haut niveau de fiabilité.



MAI

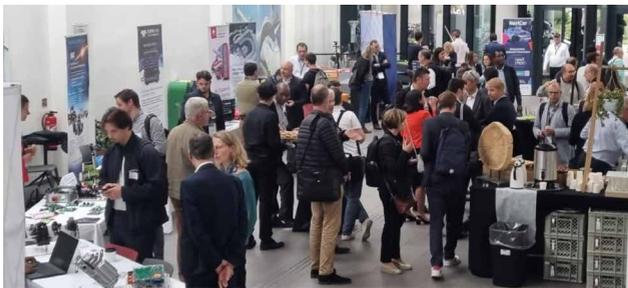
LE CARNOT IFPEN TE CONTRIBUE À DEUX PROJETS LAURÉATS DE L'AAP « DÉMONSTRATEURS D'IA FRUGALE POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE DES TERRITOIRES »

Les projets Predict'Air et AMELIA ont été sélectionnés au titre de l'appel à projets « Démonstrateurs d'IA frugale pour la transition écologique des territoires ».

Porté par l'Établissement public territorial Paris Ouest la Défense (POLD) et conduit avec le Carnot IFPEN TE, Citepa, Orange et Air&D, Predict'Air vise à développer un observatoire dynamique et prédictif de la mobilité et de ses impacts sur l'air et le climat. Quant au projet AMELIA - mené par la start-up Waltr en partenariat avec le Carnot IFPEN TE, l'université Gustave Eiffel, Bruitparif et l'Établissement public territorial Paris Est Marne & Bois (PEMB) - il a pour objectif d'utiliser l'IA pour mieux suivre et réduire la pollution de l'air et le bruit.



JUN



DÉCARBONATION DES MOBILITÉS TERRESTRES : NOUVELLE ÉDITION ÉCLAIRANTE DES RDV

250 personnes ont assisté à la table ronde IFPEN des RDV Innovation Tech show sur la décarbonation des mobilités terrestres. Des intervenants IFPEN ont partagé leur expertise aux côtés des industriels du secteur.

LE CARNOT IFPEN TE À SIA POWERTRAIN 2024 : UN BEL ÉVENTAIL DE SOLUTIONS POUR DÉCARBONER LA MOBILITÉ AUTOMOBILE



Du 19 au 20 juin, le congrès SIA Powertrain a réuni plus de 600 professionnels du secteur autour des enjeux liés à la décarbonation en cours de cette industrie. Le Carnot IFPEN TE a pu afficher son dynamisme et son ambition en participant au comité scientifique et en exposant des technologies innovantes en matière de décarbonation et de digitalisation.



NOVEMBRE

ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE : DE NOUVEAUX MATÉRIAUX POUR DE NOUVEAUX DÉFIS



À l'occasion de la 4^e édition du TechShow électronique de puissance, les équipes du Carnot IFPEN TE ont présenté les dernières réalisations du Carnot à différents niveaux de maturité technologique et ont pu partager les premiers résultats de leurs travaux collaboratifs sur les semi-conducteurs diamant.

PARTENARIAT CGD/IFPEN : UN ONDULEUR DE NOUVELLE GÉNÉRATION EN AVANT-PREMIÈRE À ELECTRONICA 2024

Cambridge GaN Devices (CGD) et IFPEN se sont associés pour développer un onduleur à base de composants à large bande GaN qui a été présenté en avant-première sur le stand de Cambridge GaN Devices Ltd au salon electronica à Munich.



INNOVATIONS

EN ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE POUR LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE ET HYDROGÈNE

Les travaux du Carnot IFPEN TE en électronique de puissance se sont intensifiés et diversifiés en 2024. Ils concernent notamment la compréhension et la caractérisation des composants WBG (Wide Band Gap) au sein d'un système électrique et l'exploration de matériaux WBG prometteurs comme le nitrure de gallium (GaN) et le diamant.

Ils visent également à augmenter la durabilité des systèmes électriques par la mise en œuvre de nouvelles topologies et à développer de nouvelles solutions de gestion thermique et de refroidissement tout en favorisant l'éco-conception. Enfin, ils ont aussi pour but d'optimiser la puissance des systèmes multi-pack de piles à combustible (PàC) et de mieux gérer l'apport d'air des PàC.

IMPACT DES COMPOSANTS WBG DANS LEUR ENVIRONNEMENT SYSTÈME

Le Carnot IFPEN TE étudie l'impact des composants à large bande interdite (WBG) dans les systèmes électriques et leurs mécanismes de vieillissement, dans le cadre de collaborations comme le projet ARCHIMEDES, où les équipes du Carnot ont contribué en 2024 à l'élaboration de méthodologies pour l'évaluation des verrous techniques liés à la fiabilité des composants WBG, dans le but d'augmenter leur efficacité et leur durée de vie. En partenariat avec Cambridge GaN Devices (CGD), un onduleur innovant basé sur des dispositifs GaN avancés a par ailleurs été développé. Ce module demi-pont constitue une brique essentielle pour les onduleurs de traction de prochaine génération en technologie GaN.

EXPLORATION D'UN NOUVEAU MATÉRIAU : LE DIAMANT DOPÉ



En 2024, le Carnot IFPEN TE a exploré le diamant comme matériau prometteur. En collaboration avec la start-up DiamFab, des composants en diamant dopé ont été caractérisés, démontrant une résistance accrue aux hautes températures et tensions. Ces semi-conducteurs, plus performants que ceux en silicium, permettent une miniaturisation, une meilleure efficacité et une empreinte carbone réduite. Des diodes Schottky en diamant, avec des temps de commutation très courts, ont été testées, ouvrant la voie à des équipements d'électronique de puissance plus avancés.

NOUVELLES TOPOLOGIES POUR UNE DURABILITÉ ACCURUE

Les topologies de puissance jouent un rôle clé dans l'amélioration de la durabilité des systèmes électriques. Le Carnot IFPEN TE propose des architectures novatrices exploitant les composants WBG pour augmenter les densités de puissance massique et volumique. Dans le cadre du projet européen EMPOWER, un onduleur à très forte densité de puissance a été développé en 2024 pour des applications poids lourds.

OPTIMISATION DES SYSTÈMES MULTI-STACKS DE PILES À COMBUSTIBLE

Le Carnot IFPEN TE a également mené des travaux sur les convertisseurs de puissance destinés aux systèmes multi-stacks de piles à combustible, dans le cadre notamment du PEPR H2 et du projet HYSYSPEM qui vise à optimiser les systèmes hybrides utilisant des PàC PEM multi-stacks pour des applications de forte puissance (camions, trains, avions). Les équipes du Carnot définissent les meilleures topologies de convertisseurs de puissance pour ces systèmes modulaires, avec des tensions de bus DC allant de 800 à 1500V. Une interface entre les boucles de contrôle des convertisseurs et la gestion énergétique globale est également en cours de développement.

GESTION THERMIQUE ET REFROIDISSEMENT

Pour maximiser les performances des composants WBG, le Carnot IFPEN TE développe des solutions avancées de gestion thermique. Ces composants, générant des pertes de puissance élevées, nécessitent des systèmes de refroidissement optimisés.

Des concepts innovants, actifs (injection de caloporteur liquide, immersion) ou passifs (potting, conduction thermique) ont été expérimentés en 2024. Une attention particulière est portée à la compréhension du comportement thermique des composants intégrés dans les cartes électroniques.



ÉCO-CONCEPTION DES ONDULEURS

Dans le cadre du projet CORAM Mautiv'8, le Carnot IFPEN TE a travaillé sur l'éco-conception des onduleurs de traction pour le marché des transports routiers (VL, VUL, VU) en technologie 800V. Des densités de puissance massique et volumique supérieures à l'état de l'art sont attendues pour ces onduleurs de nouvelle génération.

AMÉLIORATION DE L'APPORT D'AIR DANS LES PILES À COMBUSTIBLE

Enfin, dans le cadre du projet ADEME SMAC-FC, piloté par ENOGIA, qui vise à concevoir des compresseurs d'air compacts et efficaces pour les PàC hydrogène et qui combine des expertises en turbomachines, électronique et aérodynamique, le Carnot IFPEN TE a mis au point en 2024 une électronique de puissance compacte et modulaire (8 à 30 kW) ainsi que les algorithmes de contrôle associés.

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.

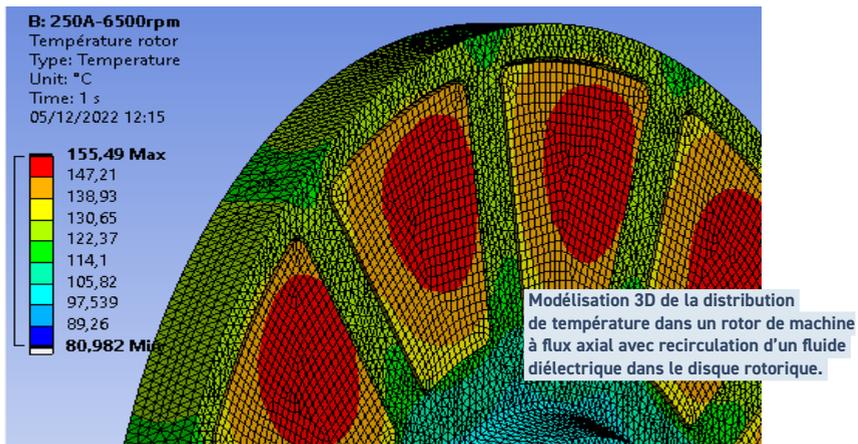
MOBILITÉ ÉLECTRIFIÉE

MACHINES ÉLECTRIQUES INNOVANTES

En 2024, le Carnot IFPEN TE a poursuivi ses recherches sur les motorisations électriques innovantes, en se concentrant sur le développement et les tests de prototypes de machines à flux axial dédiées à la traction électrique. Ces architectures, caractérisées par une forte densité de puissance, nécessitent une gestion efficace de l'évacuation de la chaleur dans des volumes restreints et ont fait l'objet d'exploration de nouvelles approches en matière de refroidissement.

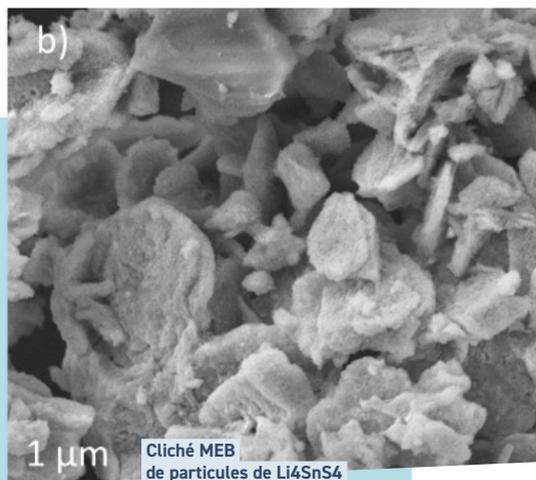
Les travaux ont notamment porté sur l'implémentation de solutions avancées de refroidissement pour les composants critiques, tels que le bobinage statorique et les aimants du rotor, afin de limiter leurs contraintes thermiques.

Pour optimiser la dissipation thermique, les équipes du Carnot ont exploré l'utilisation de fluides diélectriques dans des configurations simplifiées, améliorant ainsi l'efficacité du système sans en accroître la complexité. L'utilisation de modèles thermiques 3D a permis d'estimer une réduction de la température maximale du bobinage et des aimants pouvant atteindre respectivement 40 % et 30 % en fonctionnement continu. Par ailleurs, la segmentation des stators, conçue pour faciliter l'assemblage et la construction de la machine, a été mise à profit pour rapprocher les dispositifs de refroidissement des zones les plus sensibles. Cette approche permet une meilleure gestion thermique et contribue à prolonger la durée de vie des composants.



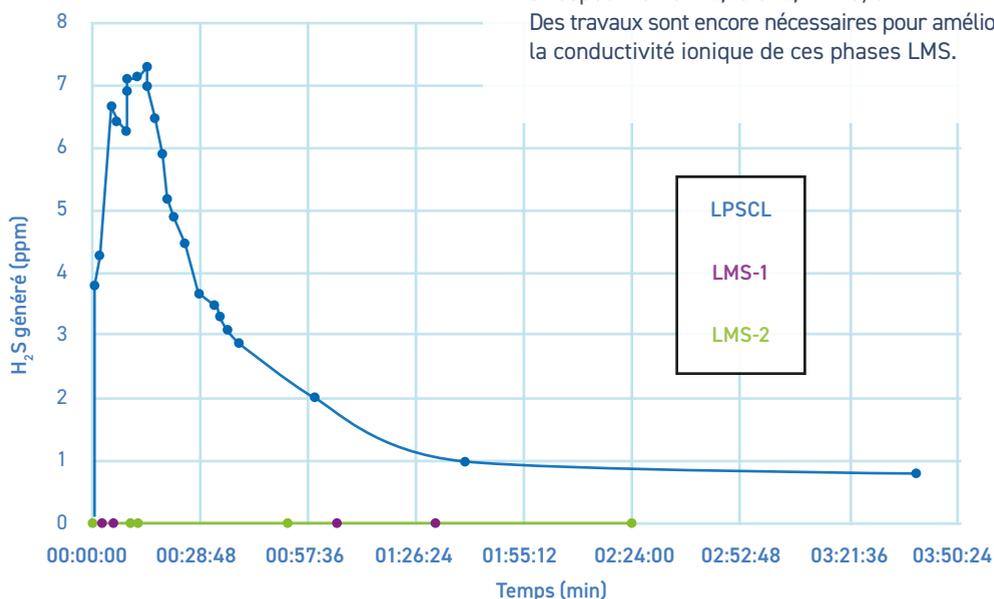
ÉLECTROLYTES SULFURES POUR BATTERIES TOUT-SOLIDE

Les batteries tout-solide sont vues comme une alternative prometteuse aux batteries lithium-ion, visant à améliorer la sécurité et la densité énergétique grâce à l'utilisation d'électrolytes solides. Les électrolytes sulfures de type argyrodite (LPSX) sont particulièrement intéressants car ils sont densifiables à froid et présentent une bonne conductivité ionique (>1 mS/cm). Cependant, leur sensibilité à l'humidité et la génération de sulfure d'hydrogène posent des défis majeurs pour leur utilisation industrielle, et ce même en salle anhydre (127 ppmv H_2O). En 2024 cette action a permis d'explorer la synthèse de phases LMS alternatives Li_4SnS_4 . Deux méthodes de synthèse (en voies liquide ou solide) ont été mises au point et confirment le gain important en stabilité des phases LMS vis-à-vis de l'atmosphère d'une salle anhydre, comparées à l'argyrodite. Mais ce matériau présente une faible conductivité ionique.



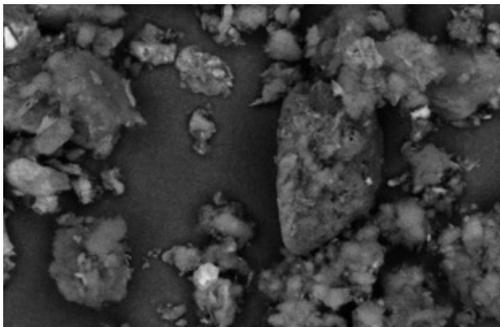
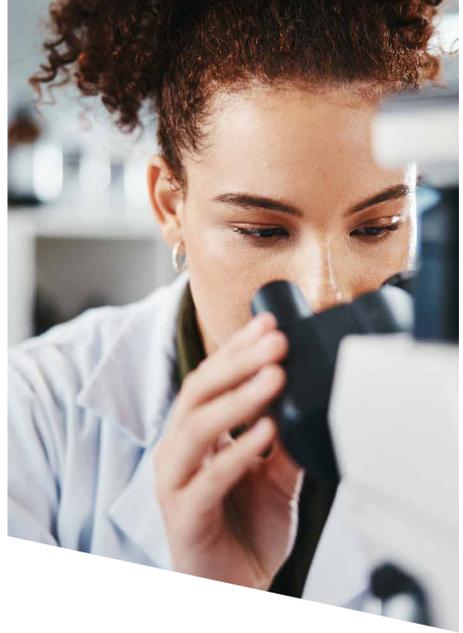
b)
Cliché MEB
de particules de Li_4SnS_4
dopées avec As synthétisées
en voie liquide

MESURE DE LA GÉNÉRATION DE H_2S EN SALLE ANHYDRE

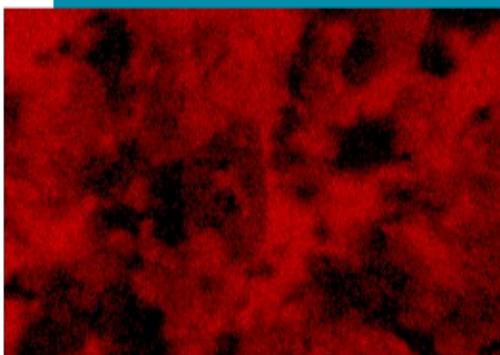


DURÉE DE VIE DES BATTERIES LI-S À ELECTROLYTE SOLIDE

Les batteries lithium-soufre (Li-S) offrent une densité énergétique théorique bien supérieure à celle des batteries Li-ion. Elles sont moins coûteuses et présentent un impact environnemental réduit grâce à l'utilisation de soufre abondant et un moindre usage de métaux critiques. Leur développement industriel est freiné par un problème de durée de vie, lié au phénomène de navette redox des polysulfures formés. Cette action avait pour objet l'étude de systèmes lithium soufre utilisant des électrolytes solides pour limiter ce phénomène et améliorer la durabilité. En 2024, l'étude s'est focalisée sur l'utilisation d'électrolytes sulfures de type argyrodite. Sans électrolyte liquide, il faut résoudre les problèmes de transports ionique et électronique au sein de la cathode.



C K α 1_2



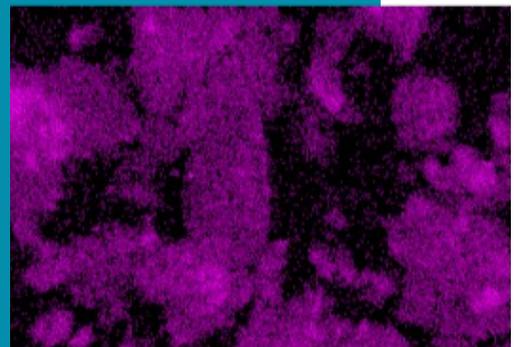
100 μ m

Figures : Clichés de microscopie électronique à balayage représentant une matière active (Li₂S) imprégnée dans un carbone poreux

Des formulations de cathode tout-solide avec des matériaux de référence ont été évaluées et une méthodologie mise en place afin d'améliorer les contacts entre matériaux, diminuer les résistances et améliorer la capacité des cellules.

Des matériaux innovants ont aussi été développés par imprégnation de matière active dans la porosité d'un carbone. Ces premiers travaux ont permis d'appréhender la complexité du système Li-S tout solide et de développer les outils nécessaires pour poursuivre les recherches, qui requièrent encore des optimisations afin d'atteindre des performances élevées.

S K α 1



100 μ m

PLATEFORME D'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DES TRANSPORTS

Des avancées significatives ont été réalisées en 2024 dans le développement d'une chaîne d'outils automatisés pour l'analyse multicritère, visant à définir des stratégies de décarbonation du secteur routier.

L'objectif principal était d'intégrer et d'actualiser les simulateurs énergétiques ainsi que les modèles d'analyse du cycle de vie (ACV) de toutes les technologies de propulsion dans le périmètre des analyses (allant du véhicule thermique conventionnel au tout-électrique à batterie, en passant par les architectures électrifiées rechargeables et la pile à combustible), couvrant un large spectre de véhicules, du deux-roues aux poids lourds, et de vecteurs énergétiques (tels que les carburants avancés et l'hydrogène).

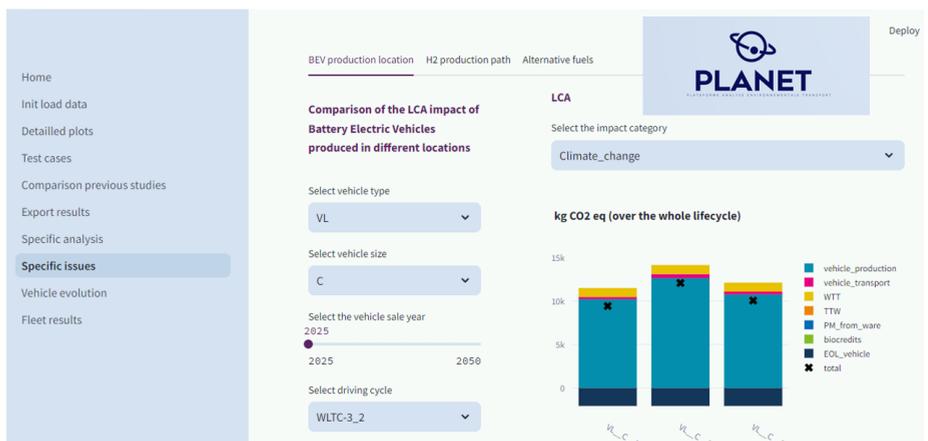
Ces modélisations ont été enrichies par une mise à jour des données de coûts dans un calculateur TCO (Total Cost of Ownership) et couplées à un outil d'ACV développé sous Python, basé sur l'outil open source Brightway2.

Ce choix technologique offre une grande flexibilité et permet un couplage efficace avec les autres modules de la chaîne d'outils, appelée plateforme PLANET.

Une interface interactive de visualisation a également été développée, facilitant une comparaison dynamique et intuitive des performances énergétiques, économiques et environnementales des différentes solutions. Enfin, les bases ont été posées pour intégrer à ces outils des modèles de parc et d'infrastructures, essentiels à la décarbonation, tout en évaluant des politiques prospectives. Ces avancées permettront, dès 2025, l'exploitation complète de cette chaîne d'outils pour des scénarios de backcasting et des études prospectives sur la mobilité durable.

INTERFACE GRAPHIQUE DE PLANET

Interface graphique pour l'exploration des résultats de la plateforme PLANET. La capture de l'outil présente la comparaison des émissions de CO₂eq en kg pour différents véhicules tout électrique à batterie en fonction du lieu de production.





UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

Dans le cadre de leurs travaux de recherche, les équipes du Carnot IFPEN Transports Énergie 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. Focus sur les projets démarrés en 2024.



Pour un panorama complet des projets dans lesquels le Carnot IFPEN Transports Énergie était engagé en 2024 (motorisations et carburant bas carbone, analyse environnementale et ACV des transports, gestion des données de mobilité, villes intelligentes), flashez le QR code.

| ACRONYME | TITRE DU PROJET | FINANCEUR | PÉRIODE |
|---------------------------------------|---|-----------------------|-----------|
| Mobilité électrique | | | |
| ENLIGHTEN | Next generation 1200V electric high voltage powertrain | Commission européenne | 2024-2027 |
| MAGELLAN | Magnets in resilient supply chains | Commission européenne | 2024-2027 |
| Stockage d'énergie (batteries) | | | |
| BatCAT | Battery cell assembly twin | Bpifrance | 2024-2027 |
| Hylist | Hybrid Lithium Metal-based Scalable Solid State Battery Manufacturing | ANR | 2024-2027 |
| ISSTOGRAM | Industrialisation d'un système de stockage recyclable pour la mobilité | Bpifrance | 2024-2027 |
| RIDERS | Training in cutting-edge battery technologies: high-performance materials and researches for future electrochemical storage | Commission européenne | 2024-2026 |

POUR SUIVRE L'ACTUALITÉ D'IFPEN AU QUOTIDIEN



NOS ÉTABLISSEMENTS

Rueil-Malmaison

1 et 4, avenue de Bois-Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex
Tél. : +33 1 47 52 60 00

Lyon

Rond-point de l'échangeur de Solaize
BP 3 – 69360 Solaize
Tél. : +33 4 37 70 20 00

