RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

CARNOT ifpen Transports Energie

CARNOT IFPEN TRANSPORTS ENERGIE

2025

INNOVER POUR UNE MOBILITÉ DÉCARBONÉE ET DURABLE



SOMMAIRE

4 QUI SOMMES-NOUS ?

IFPEN, UN ACTEUR ENGAGÉ

6 CARNOT TRANSPORTS ENERGIE EN BREF

UN ACTEUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

8 FAITS MARQUANTS

12 GRAND ANGLE

INNOVATIONS EN MOTORISATION ÉLECTRIQUES SANS TERRES RARES

14 MOBILITÉ ÉLECTRIFIÉE

ARGYRODITE MICRONIQUE

ÉLECTROLYTES SOLIDES POUR BATTERIES LITHIUM SOUFRE

ÉCO-CONCEPTION DE MACHINES ÉLECTRIQUES À HAUTE PERFORMANCE ET FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL

18 UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

ÉDITO

ANTICIPER LES TRANSFORMATIONS À VENIR



Olga Vizika-Kavvadias, directrice du Carnot IFPEN Transports Energie

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

En 2025, notre action s'est intensifiée pour relever les défis liés à l'efficacité énergétique, à la diversification des sources d'énergie et à la performance environnementale.

L'électrification des véhicules a une nouvelle fois occupé une place centrale dans nos travaux, avec des avancées sur les systèmes de propulsion, les batteries et les infrastructures de recharge. Ces efforts ont permis de valoriser nos solutions innovantes, notamment les technologies de motorisation électrique. Notre partenariat avec MovNtec, consacré à la conception de moteurs haute performance à faible impact environnemental, illustre parfaitement cette dynamique.

124 MT CO_2

En 2025, le secteur des transports représentait environ 34 % des émissions totales de gaz à effet de serre en France.

Plus précisément, le transport routier est responsable de 124 Mt CO_2.

L'article « Grand angle » de ce rapport revient d'ailleurs sur ce succès emblématique.

Parallèlement, nos recherches sur les batteries solides et les algorithmes de diagnostic ouvrent de nouvelles perspectives pour la durabilité et la sécurité des systèmes de stockage d'énergie. L'année 2025 a notamment été marquée par des avancées en matière d'optimisation des électrolytes solides, tels que les argyrodites.

En complément, notre expertise en analyse environnementale a été renforcée grâce à des outils digitaux avancés et des études prospectives structurantes, conçus pour accompagner les territoires dans leurs stratégies de mobilité.

À travers ces réalisations, le Carnot IFPEN TE illustre son rôle clé dans l'accélération de la transition du secteur des transports. Ce rapport témoigne de la richesse de nos contributions et de notre vision pour une mobilité sobre, durable et résiliente.

Bonne lecture !

QUI SOMMES-NOUS ?

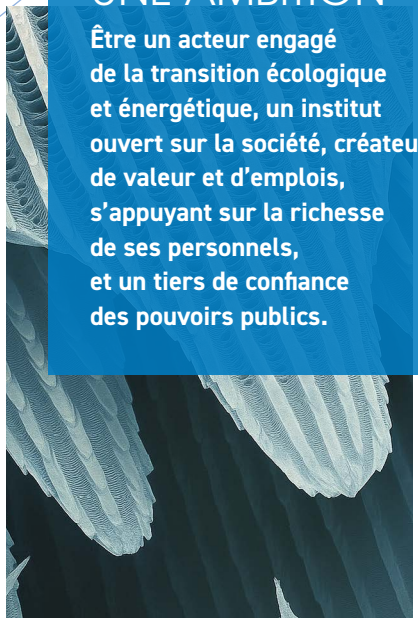
UN ACTEUR ENGAGÉ POUR UN AVENIR DURABLE

IFP Energies nouvelles (IFPEN) est l'Institut national de recherche, innovation et formation en énergie, mobilité et environnement. Ses équipes innovent pour un monde décarboné et durable depuis les concepts scientifiques jusqu'aux solutions technologiques. Procédés, équipements, catalyseurs et adsorbants, logiciels et services : ses innovations bas-carbone posent les jalons de la transition 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 et énergétique. Son ambition : développer des technologies concrètes, éprouvées et économiquement viables, 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 aux pouvoirs publics nationaux et européens pour la définition et la mise en œuvre de leurs politiques publiques.

UNE AMBITION

Être un acteur engagé de la transition écologique et énergétique, 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.



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 pré-industriels ;
- **une expertise en simulation numérique et analyse de données haute performance ;**
- **des analyses** environnementales et de cycle de vie ;
- **une stratégie de partenariats** avec les industriels, les PME et ETI et les institutions académiques.

DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES AU SERVICE DE LA TRANSITION

DÉFI ÉNERGIE : S'engager pour un mix énergétique bas carbone, abordable et souverain : éolien, hydrogène naturel, géothermie, stockage massif d'énergie, efficience des procédés, pilotage des systèmes énergétiques.

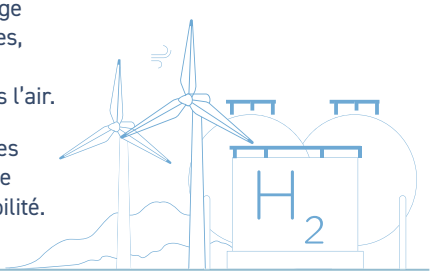
DÉFI MOBILITÉ : Décarboner les mobilités en combinant énergies et technologies, digitalisation, circularité : électrification des transports, biocarburants avancés et e-carburants.

DÉFI ENVIRONNEMENT : Maîtriser les impacts industriels pour préserver l'environnement : captage et stockage du CO_2, recyclage des plastiques et des métaux, bioproduits, gestion des ressources, traitement des eaux (micropolluants PFAS, microplastiques...), gestion du carbone dans les sols, monitoring des émissions dans l'air.

IFPEN développe ces solutions en s'appuyant sur les technologies numériques et intègre tout au long du processus des analyses de cycle de vie et technico-économiques, afin de garantir leur durabilité.

UNE MISSION

Innover pour un monde décarboné et durable



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, compétences, méthodes et outils nécessaires au développement de nouveaux produits, procédés, logiciels et services.

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.

Ancrés dans l'histoire d'IFPEN, les travaux sur les hydrocarbures représentent 15 % des activités et sont largement autofinancés.

Ces activités, notamment dans le domaine des procédés éco-efficients, agissent comme une « taxe carbone interne », avec des retours qui permettent d'accélérer la montée en puissance sur les technologies vertes qui, elles, représentent 85 % des activités.

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, PME et ETI grâce à des accords de collaboration leur offrant un accès privilégié à son expertise technique.

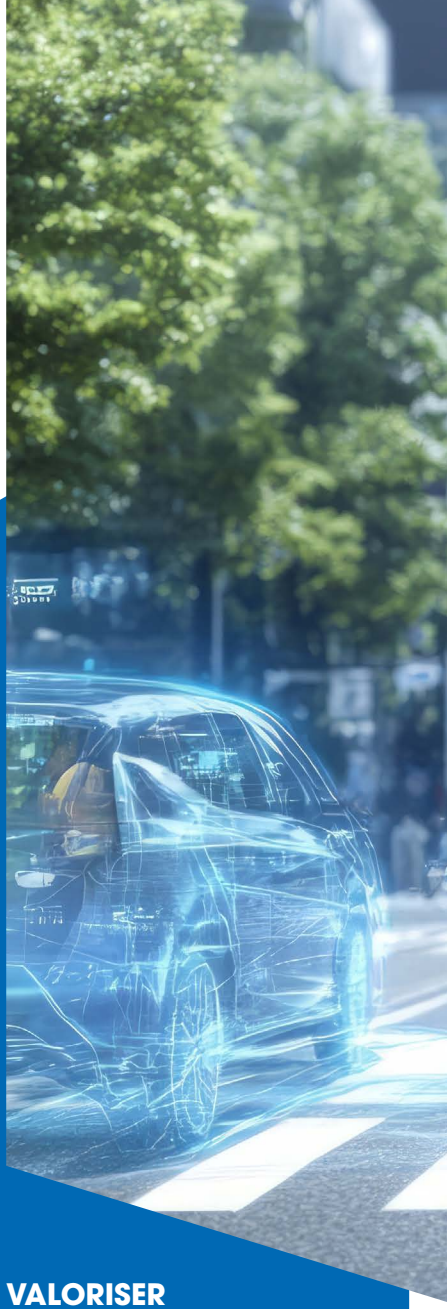
FORMER LES TALENTS DE DEMAIN

Enfin, IFP School, école d'ingénieurs de spécialisation d'IFPEN, joue un rôle essentiel dans la préparation des futures générations. Chaque année, environ 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.

EN BREF

CARNOT IFPEN TRANSPORTS ÉNERGIE

Le Carnot IFPEN TE 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 ;
- des systèmes électrochimiques de stockage et de production d'énergie (batteries et piles à combustible) et gestion optimale de l'énergie des véhicules ;
- la propulsion hydrogène et bas carbone (gaz, biogaz) *via* un moteur à combustion optimisé ainsi que son système de dépollution associé ;
- des *web services* d'analyse énergétique, économique et environnementale du transport individuel et collectif ;
- des outils de l'ingénierie de conception des systèmes de propulsion afin d'en améliorer l'efficience 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.

32
PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIVE
en 2025 auxquels contribuent

près de **247**
ENTREPRISES PARTENAIRES

340
PERSONNES IMPLIQUÉES DANS LES PROJETS

Dont **45**
DOCTORANTS

BREVETS

24
BREVETS DÉPOSÉS DANS L'ANNÉE

et **274**
DÉTENUS DANS LE PORTEFEUILLE DE BREVETS

57
CONTRATS EN 2025
pour un panel de
30 ENTREPRISES

25
PUBLICATIONS DE RANG A

FAITS MARQUANTS

JANVIER

HYLIST : PRÉPARER LA PROCHAINE GÉNÉRATION DE BATTERIES TOUT SOLIDE



Le Carnot IFPEN TE a pris une place centrale dans le lancement du projet européen HyLiST, qui réunit douze partenaires autour du développement d'une technologie de batterie tout solide de nouvelle génération. L'ambition est de concevoir des batteries plus performantes, plus sûres et mieux adaptées aux besoins futurs de la mobilité électrique et de l'aéronautique.

FÉVRIER

MOBIL'IN PULSE : LES EXPERTISES DU CARNOT AU RENDEZ-VOUS DES MOBILITÉS INTELLIGENTES

À l'occasion de la 52e édition de Mobil'in Pulse, événement majeur de la filière des systèmes de transport intelligents, les équipes du Carnot IFPEN TE ont présenté leurs travaux consacrés à la digitalisation et à la décarbonation des mobilités.
Les échanges avec les acteurs publics, industriels et académiques ont permis de mettre en lumière la diversité des solutions développées dans les domaines de la mobilité connectée, de l'aide à la décision et de l'optimisation des systèmes de transport.

AVRIL

AURANODE : UNE AVANCÉE MAJEURE VERS L'INDUSTRIALISATION DES BATTERIES DE NOUVELLE GÉNÉRATION EN EUROPE

La clôture du projet AuRAnode marque une étape importante pour la filière européenne des batteries.
Mené avec ENWIRES et Tokai Cobex, ce programme a permis le développement de SiBoost™, un matériau innovant à base de silicium et de graphite capable de doubler la densité énergétique des anodes. Le Carnot IFPEN TE a joué un rôle déterminant dans cette réussite grâce à ses travaux de caractérisation multiéchelle, d'analyse physico-chimique et de modélisation du comportement des matériaux.



UNE PRÉSENCE RENFORCÉE DANS LES INSTANCES EUROPÉENNES POUR UNE MOBILITÉ DÉCARBONÉE

Le renouvellement du comité de direction d'EGVIAfor2Zero confirme la reconnaissance des expertises du Carnot IFPEN TE au niveau européen. En siégeant au sein de cette association stratégique qui dialogue directement avec la Commission européenne, le Carnot contribue à orienter les futures priorités de recherche et d'innovation dans le domaine de la mobilité bas carbone.

JUIN

UNE COOPÉRATION EXEMPLAIRE RÉCOMPENSÉE POUR ACCÉLÉRER L'ÉLECTRIFICATION DES MOBILITÉS



La collaboration entre le Carnot IFPEN TE et TechnoMAP a été distinguée lors des NextMove Awards 2025. Cette reconnaissance met en lumière une démarche de transfert technologique réussie ayant conduit à la création de TEC E MOUV, une holding industrielle dédiée à l'électrification des mobilités.

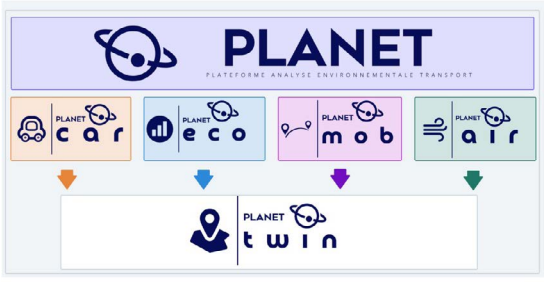
SIA POWERTRAIN : UNE VITRINE DES INNOVATIONS DÉVELOPPÉES AVEC LES PARTENAIRES INDUSTRIELS



Lors du congrès SIA Powertrain, les équipes du Carnot ont présenté plusieurs démonstrateurs illustrant leurs travaux dans les domaines des moteurs électriques, de l'électronique de puissance, des batteries et des systèmes énergétiques. Réalisées avec de nombreux partenaires industriels, ces innovations témoignent de la richesse de l'écosystème collaboratif construit autour du Carnot.

JUILLET

PLANET : UNE PLATEFORME NUMÉRIQUE POUR ÉCLAIRER LES CHOIX DE MOBILITÉ ET LES TRAJECTOIRES DE DÉCARBONATION



Fruit de plusieurs années de recherche, le programme PLANET rassemble les outils développés par le Carnot pour analyser les impacts environnementaux des transports et simuler différents scénarios de mobilité. Destinée aux collectivités, aux professionnels et aux décideurs publics, cette plateforme permet d'évaluer les conséquences des choix d'aménagement ou de politique publique sur les émissions, les consommations d'énergie et les nuisances.

UNE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE FRUGALE AU SERVICE DE LA QUALITÉ DE VIE DANS LES TERRITOIRES

Lancé en partenariat avec WaltR, Bruitparif, l'Université Gustave Eiffel et l'établissement public territorial Paris Est Marne & Bois, le projet AMELIA ambitionne de développer des outils de cartographie environnementale fondés sur une intelligence artificielle sobre en ressources. Les travaux visent à mieux comprendre les impacts de la mobilité sur la qualité de l'air et le bruit afin d'accompagner les collectivités dans leurs choix d'aménagement.

SEPTEMBRE

ICE 2025 : PARTAGER LES AVANCÉES SCIENTIFIQUES AU SERVICE DES MOBILITÉS DU FUTUR



La conférence internationale ICE 2025 a rassemblé à Capri les principaux spécialistes mondiaux des systèmes de propulsion et du transport durable. Coorganisé avec le soutien d'IFPEN, l'événement a permis aux équipes du Carnot de présenter leurs recherches sur les motorisations, les systèmes énergétiques et le stockage d'énergie.

OCTOBRE

À BRUXELLES, LE CARNOT MET EN AVANT LES TECHNOLOGIES QUI PRÉPARERONT LA MOBILITÉ EUROPÉENNE DE DEMAIN



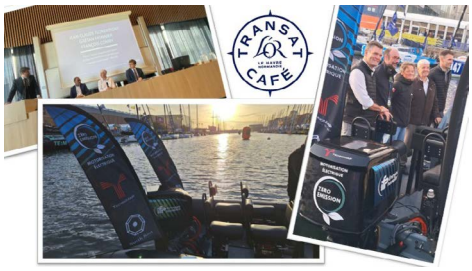
Lors du Future of Road Mobility Forum organisé par EARPA, le Carnot IFPEN TE a présenté plusieurs innovations issues de projets européens et de partenariats industriels. Cette présence a permis de démontrer la diversité des solutions développées pour renforcer la compétitivité et la souveraineté technologique européennes dans le domaine des mobilités décarbonées.

MOVNTEC ET IFPEN : UNE COLLABORATION AU SERVICE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES SANS TERRES RARES

Mise à l'honneur lors de l'événement Innovative Mobility by CARA, la coopération entre MovNtec et le Carnot IFPEN TE illustre la capacité de la recherche partenariale à faire émerger des innovations industrielles concrètes. Ensemble, les partenaires développent une nouvelle génération de moteurs électriques 48 V conçus sans terres rares. Une approche qui répond à la fois aux enjeux environnementaux et aux défis de souveraineté industrielle.



DÉCARBONER LE TRANSPORT MARITIME : UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE PORTÉE PAR LE CARNOT



Invité à intervenir lors d'une journée consacrée à l'avenir du transport maritime, le Carnot IFPEN TE a rappelé la nécessité de combiner innovations technologiques, nouveaux carburants, optimisation des usages et évolutions réglementaires pour atteindre les objectifs climatiques du secteur. Cette vision s'est concrétisée par la présentation du prototype de bateau électrique 730 e-Ocean développé avec TechnoMAP, équipé d'un moteur et d'une électronique de puissance issus des travaux de recherche du Carnot.

MOBIDEC : FÉDÉRER LA RECHERCHE FRANÇAISE POUR ANTICIPER LES MOBILITÉS DE DEMAIN



Piloté par le Carnot IFPEN TE et l'Université Gustave Eiffel, le PEPR MOBIDEC poursuit sa structuration avec l'organisation de sa première journée scientifique. Ce programme national mobilise chercheurs, collectivités et acteurs économiques autour de la compréhension des mobilités, de l'exploitation des données et du développement d'outils d'aide à la décision.

LES RENDEZ-VOUS CARNOT, UNE VITRINE DES INNOVATIONS POUR LA MOBILITÉ DÉCARBONÉE

À Lyon, le Carnot IFPEN TE a présenté l'étendue de son offre de recherche partenariale dans les domaines des batteries, des motorisations électriques, de la mobilité hydrogène, de la connectivité et des outils numériques. Les démonstrateurs exposés, notamment un moteur sans terres rares développé avec MovNtec et un onduleur innovant conçu avec TotalEnergies, ont illustré la capacité du Carnot à accompagner les industriels dans leurs stratégies d'innovation et de transition énergétique.

NOVEMBRE

TAP 2025 : IFPEN RÉUNIT LA COMMUNAUTÉ INTERNATIONALE AUTOUR DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES TRANSPORTS

Organisée sur le site de Rueil, la conférence internationale TaP 2025 a rassemblé chercheurs, industriels et décideurs publics autour des enjeux liés aux impacts des transports sur l'environnement et la santé. Pour la première fois, les discussions ont dépassé la seule question de la qualité de l'air pour intégrer également le bruit, les sols, l'eau et les approches multicritères.

TaP
Transport and Pollution
Paris 2025
Hosted by ifpen



INNOVATIONS
EN MOTORISATIONS ÉLECTRIQUES SANS TERRES RARES

Le Carnot IFPEN TE conçoit des solutions innovantes pour l'ensemble des marchés de la mobilité, en s'associant à des grands industriels, des PME, ETI ou start-ups. Le partenariat initié en 2023 avec la société MovNtec a permis à IFPEN d'innover dans le secteur des mobilités légères, dans l'objectif de mettre sur le marché une gamme de moteurs électriques réparables, recyclables et sans terres rares.

UN SOUTIEN TECHNIQUE COMPLET AU SERVICE DE L'INNOVATION



À l'origine filiale du groupe allemand Lenze, MovNtec est devenue une PME indépendante depuis 2022, avec l'ambition de s'imposer comme un acteur clé de la mobilité électrique en France. MovNtec s'est rapproché du Carnot IFPEN TE pour la conception d'une chaîne de traction électrique, à savoir une gamme de moteurs de 2 à 15 kW, et une électronique embarquée flexible à haute performance. Spécialiste de la fabrication de systèmes électriques et électroniques, MovNtec a apporté son expertise du prototypage à l'industrialisation. Les systèmes de propulsion développés par IFPEN seront utilisés à terme par MovNtec pour son véhicule léger le « Galibot ».

Au-delà de cette application propre, les chaînes de traction seront commercialisées auprès d'autres constructeurs et intégrateurs, afin d'adresser un marché plus large de la mobilité électrique légère. Cette opportunité permet au Carnot IFPEN TE d'entrer sur ce marché, en apportant son savoir-faire historique dans le monde de l'automobile.

OPTIMISATION DES SYSTÈMES MOTORISÉS

La gamme de moteurs développée par IFPEN dans le cadre de ce partenariat est composée de plusieurs niveaux de puissance : une première famille à faible puissance (2, 4 et 6 kW) et une seconde offre à 15 kW. Il s'agit de machines synchro-réluctantes assistées d'aimants permanents, qui fonctionnent sous une tension nominale de 48 V et sont refroidies par convection naturelle. Ces systèmes motorisés permettent d'atteindre des rendements maximaux supérieurs à 94 %, une performance remarquable pour cette classe de puissance. Ils correspondent parfaitement aux besoins des véhicules de taille intermédiaire et de la mobilité légère.
Les moteurs ont également été optimisés en termes de volume et de masse, afin de permettre une fabrication zéro déchet, une réparation en cours de vie et une recyclabilité en fin de vie. De plus, le processus de fabrication est conçu pour être le moins énergivore possible.
Enfin, des efforts ont été réalisés pour minimiser la masse et le volume des pièces à remplacer en cas de panne, dans un souhait de durabilité.

UN PROJET DE RÉINDUSTRIALISATION ET DE SOUVERAINETÉ NATIONALE

Le choix de matériaux sans terres rares, approvisionnés localement, et de moteurs recyclables et réparables en France contribuent à la souveraineté nationale et européenne.

Le projet est soutenu par France 2030 dans le cadre du chantier prioritaire « Produire en France, à l'horizon 2030, 2 millions de véhicules zéro émission », mais également par le fonds européen Transition Juste dans le cadre du consortium E-MOBI. MovNtec est lauréate du programme ETIncelles, dont l'objectif est d'accompagner les PME de croissance dans leur développement pour contribuer à la réindustrialisation du tissu économique français.

En accompagnant des PME/ETI françaises, le Carnot IFPEN TE contribue aussi à développer le tissu industriel, tout en garantissant la valorisation de sa recherche au travers de redevances.



MOVNTEC

« Nous avons remarqué que les différents acteurs de la mobilité avaient du mal à trouver sur le sol français, voire européen, des moteurs électriques qui convenaient à leur application. Forts de ce constat, nous avons décidé de nous lancer vers le développement et l'industrialisation d'un moteur électrique de fabrication française, en partenariat avec IFPEN. La réindustrialisation française est une nécessité pour essayer de limiter l'impact, notamment asiatique, sur la fourniture de composants. »



Antoine Cumin,
dirigeant de MovNtec

Pour aller plus loin :

Podcast CARA – Raconte-moi les mobilités saison 3 # 1

Toutes nos solutions sur la mobilité électrifiée

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.

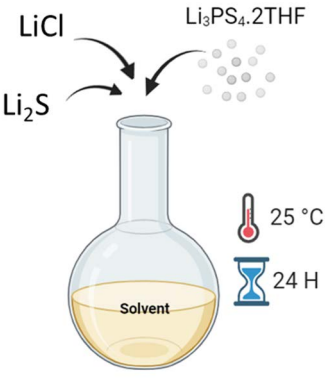
MOBILITÉ ÉLECTRIFIÉE

ARGYRODITE MICRONIQUE

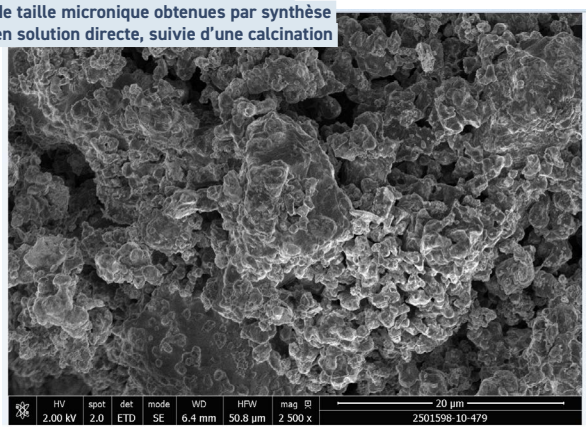
Les argyrodites (Li6PS5X, X = Cl, Br, I) figurent parmi les électrolytes solides les plus prometteurs pour les batteries tout-solide, mais le contrôle précis de leur granulométrie reste un défi. À ce jour, la taille des particules est ajustée par post-traitement (broyage ou dissolution-précipitation), mais ces méthodes restent insatisfaisantes. En s'appuyant sur notre expertise dans la synthèse de particules de Li3PS4 avec des tailles et morphologies contrôlées, de nouvelles méthodes de synthèse en solutions adaptées aux argyrodites sont développées, pour produire directement des particules d'environ 3 µm avec une conductivité ionique supérieure à 1 mS/cm. Les premiers essais montrent l'importance cruciale du choix du solvant de lavage et des conditions de calcination. Par exemple, une atmosphère particulière de calcination améliore la conductivité ionique, mais accroît la taille des particules. Deux méthodes principales sont explorées :

- la première produit des particules avec une distribution volumique (DV50) de 5,3 µm et une conductivité ionique de 1,2 mS/cm ;
- la seconde, 48 fois plus rapide que la première, produit des particules de 16,8 µm avec une conductivité équivalente de 1,1 mS/cm.

Ces avancées constituent une étape clé vers un meilleur contrôle de la formation de particules d'argyrodites répondant aux exigences des batteries de nouvelle génération.



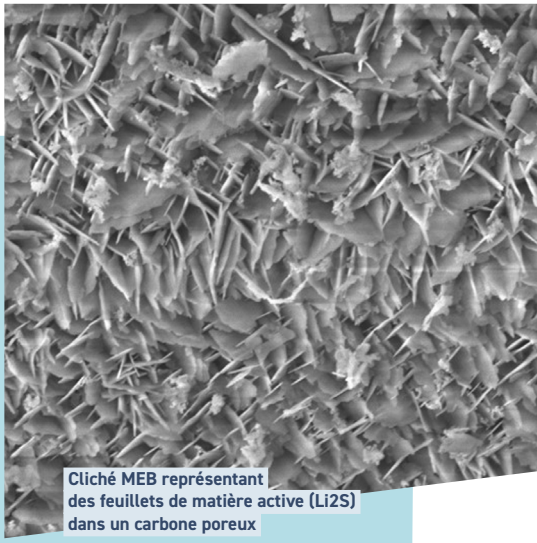
Cliché MEB de particules de Li6PS5Cl de taille micronique obtenues par synthèse en solution directe, suivie d'une calcination



ÉLECTROLYTES SOLIDES POUR BATTERIES LITHIUM-SOUFRE

Les batteries lithium-soufre (Li-S) offrent une densité énergétique théorique supérieure à celle des Li-ion, tout en étant plus économiques et respectueuses de l'environnement grâce au soufre abondant et à un usage réduit de métaux critiques.
Leur industrialisation est toutefois limitée par leur faible durée de vie, due au phénomène de navette redox des polysulfures. Cette action 2025 a exploré l'utilisation d'électrolytes solides argyrodite (Li6PS5Cl) pour limiter ce phénomène et améliorer la durabilité. L'étude s'est focalisée sur l'électrode positive, sur l'agencement de la matière active avec l'argyrodite (percolant ionique) et sur le carbone (percolant électronique). Deux approches ont été étudiées :

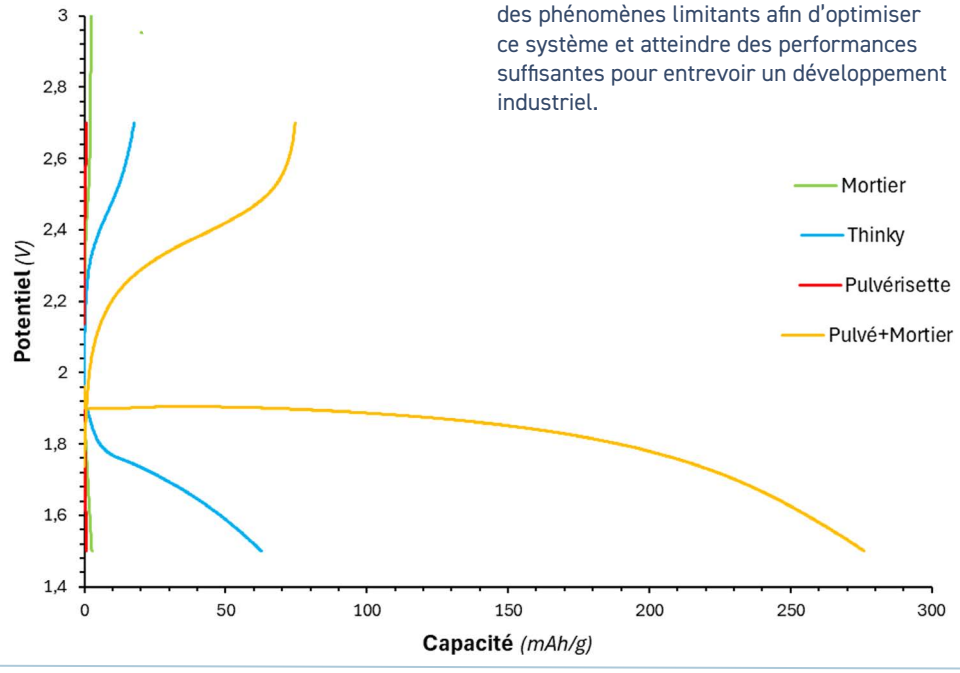
- différentes méthodes de mélange pour optimiser la dispersion et les contacts des différentes poudres ;
- des méthodes de synthèse spécifiques visant à optimiser la microstructure des matériaux et leur intégration.



Cliché MEB représentant des feuillets de matière active (Li2S) dans un carbone poreux

Ces premiers travaux montrent une légère amélioration des performances du système Li-S tout solide, bien que celles-ci restent limitées en capacité et en cyclage. Ces travaux ont permis une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu. Les recherches futures se concentreront sur l'étude approfondie des phénomènes limitants afin d'optimiser ce système et atteindre des performances suffisantes pour entrevoir un développement industriel.

COURBES DE CHARGE/DÉCHARGE D'UN SYSTÈME LI-S TOUT SOLIDE EN FONCTION DU MODE DE MÉLANGE

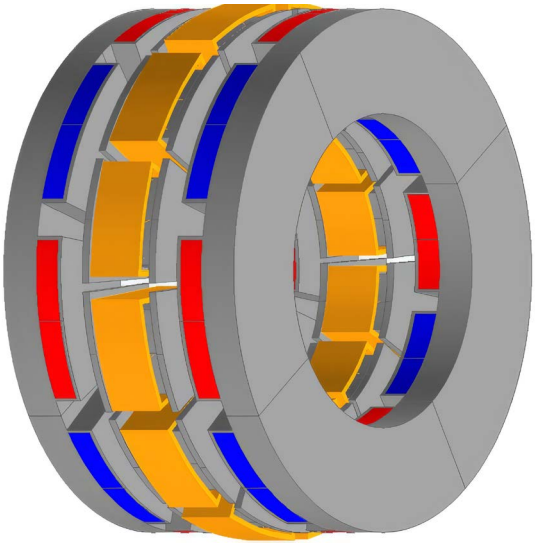


ÉCO-CONCEPTION DE MACHINES ÉLECTRIQUES À HAUTE PERFORMANCE ET FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL

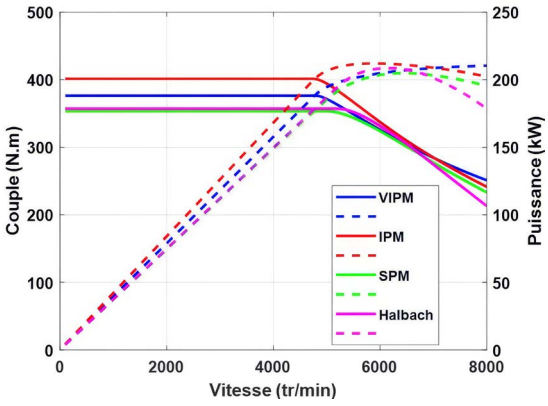
Objectifs

Conception et évaluation par simulation de nouvelles architectures de machines électriques à flux axial multi-entrefer destinées aux chaînes de traction électrique dans différents secteurs.

- Augmenter la densité de couple et de puissance.
- Réduire la masse et le volume des parties actives.
- Diminuer le recours aux matériaux critiques.
- Favoriser des solutions d'assemblage et de choix matériaux qui facilitent le recyclage et limitent l'empreinte environnementale des procédés.



Vue 3D d'une machine à flux axial double rotor avec aimants à blocage mécanique, conçue pour faciliter le démontage et le recyclage



Comparaison des caractéristiques couple–puissance de machines à flux axial double rotor pour quatre architectures d'aimants : IPM, V-IPM, SPM et Halbach

Moyens mis en place

Modélisation électromagnétique 3D par éléments finis de machines à flux axial multi-entrefer à double rotor, à partir de modèles paramétrés permettant d'explorer différentes géométries, répartitions de matériaux et principes d'assemblage. Des études numériques comparatives évaluent la densité de couple et de puissance, la masse et le coût des parties actives, l'usage de matériaux critiques et le potentiel de recyclabilité, en s'appuyant notamment sur des indicateurs issus d'outils simplifiés d'analyse de cycle de vie pour classer les architectures étudiées.

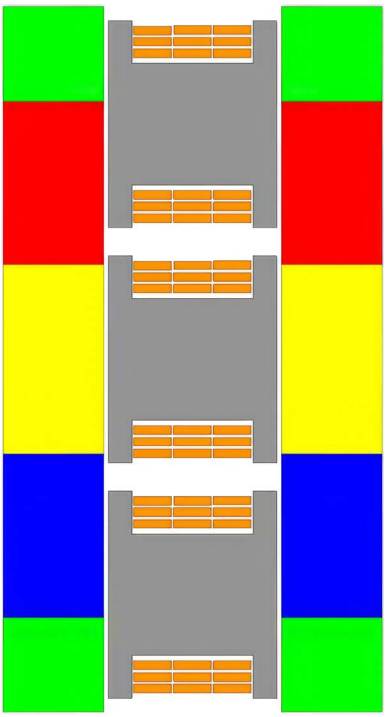
Résultats obtenus

Des campagnes de simulation ont été menées pour comparer des architectures de machines à flux axial multi-entrefer sans culasse statorique, en visant un assemblage rotors/stator simplifié et une réparation du bobinage facilitée. Les topologies à aimants en surface et enterrés ont été explorées, mettant en évidence des compromis entre facilité de fabrication, pertes, contraintes thermiques et gestion des composants en fin de vie. Les configurations à aimants enterrés se distinguent par des pertes dans les aimants réduites et une meilleure robustesse mécanique, tandis que les architectures à aimants en surface restent plus simples à réaliser mais présentent une sensibilité accrue aux pertes et aux contraintes thermiques.

Ces résultats se déclinent en deux profils :

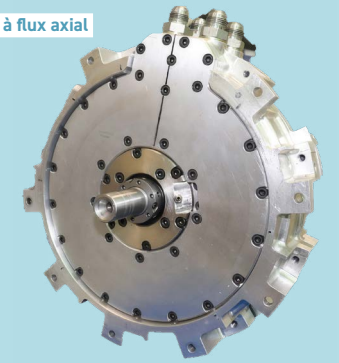
- une version orientée compacité, forte densité de puissance et haut rendement ;
- une version frugale en matériaux critiques, allégée en aimants permanents et conçue pour un démontage et un recyclage facilités, les aimants enterrés offrant un compromis intéressant entre ces deux profils.

L'intérêt d'utiliser des tôles à grains orientés pour le stator a également été mis en évidence : à performances équivalentes, elles réduisent la masse de fer et donc l'empreinte matière.



Vue 2D de la topologie rotor Halbach permettant la suppression de la culasse rotorique et la réduction de la masse active

Moteur à flux axial



La hiérarchisation des architectures s'appuie sur une analyse des pertes (fer, aimants, Joule) *via* modélisation 3D/2D, couplée à des indicateurs d'ACV simplifiés (masse de matériaux critiques, complexité d'assemblage, démontabilité). Elle montre que l'intégration simultanée des performances électromagnétiques, de la maîtrise des pertes et des enjeux de fin de vie est possible dès les premières phases de conception.

PANORAMA

UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

Dans le cadre de leurs travaux de recherche, les équipes du Carnot IFPEN TE 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 engagés en 2025.

ACRONYME	TITRE DU PROJET	FINANCEUR	PÉRIODE
	Mobilité électrique		
MODULUS	Développement d'un prototype d'onduleur de pilotage de moteurs électriques pour les marchés de niche tels que l'off-road, les poids lourds, l'aéronautique, le ferroviaire et le militaire	Région	2025-2027
	Motorisations et carburants bas carbone (dont hybride et PAC)		
DT-HATS	*Digital-Twins for Hydrogen and Ammonia injection and ignition in engines for Transport Systems*	Commission européenne	2025-2029
	Analyse environnementale et ACV des transports		
PREDICT'AIR	Estimer et prédire les émissions générées par la mobilité des populations à partir des traces des mobiles et l'utilisation de l'IA	France Ministère	2025-2029
Verdir ma Flotte	Outils dédiés aux flottes de poids lourds et de bus	ADEME	2025-2027
OPTI-VMF	Outil de planification de la décarbonation des flottes basé sur « Verdir ma Flotte »	ANR (Premat-Mat-Sci-Ty)	2025-2027
	Gestion des données de mobilité et des infrastructures de transport		
MITHOS	*Innovative decision-making tool for the federated monitoring, re-design and conservation of multimodal transport infrastructures*	Commission européenne	2025-2029
Indicateurs vélo Régionaux et Nationaux	Estimation des déplacements et kilomètres parcourus à vélo à l'échelle nationale	ADEME	2025-2026
RAISE	*Resilient multimodal transport management with shared autonomous vehicles and dynamic dedicated lanes under disruptions*	ANR	2025-2028
AMELIA	Cartographie des mobilités et de l'environnement pour la planification territoriale	France Ministère	2025-2029

POUR SUIVRE L'ACTUALITÉ D'IFPEN AU QUOTIDIEN

Rédaction : IFPEN • **Conception-réalisation :** La P'tite Fève • **Impression :** papier FSC • **Crédits photo et illustrations :** Adobe Stock, IFPEN, DR • *Droits de reproduction, textes et illustrations réservés. ISSN 2426-2390*

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