

Mobilité durable | Mobilité électrifiée

MOBILITÉ ÉLECTRIFIÉE

NOS SOLUTIONS

Les solutions proposées par IFPEN concernent :

- Les machines électriques pour la mobilité éco-conçues, à très haut rendement et fortes densités de performances.
- Les topologies de moteur novatrices telles que la machine à flux axial ou la topologie Pure Synchro-Reluctante (sans aimants).
- Les nouvelles générations d'électroniques de puissance optimisées pour les transistors à grand gap : SiC, GaN.
- Les nouveaux concepts de systèmes de refroidissements actifs à haute efficacité (injection caloporteur liquide, immersion) ou passifs (potting, composants de conduction, etc.) à coût réduit aussi bien pour les machines électriques que pour les électroniques de future génération.
- Le pilotage avancé de systèmes électriques, fondé sur des approches optimales, robustes et facilement déployées.
- L'approche holistique des compromis d'optimisation de la performance des systèmes électriques : puissance, rendement, impact écologique, coût, bruit, etc.

Ces solutions innovantes peuvent être développées pour l'ensemble des marchés de la mobilité, que ce soit pour la grande série automobile, le marché off-road ou la mobilité légère et douce.

DÉVELOPPEMENT DE MACHINES ÉLECTRIQUES SYNCHRO-RÉLUCTANTES

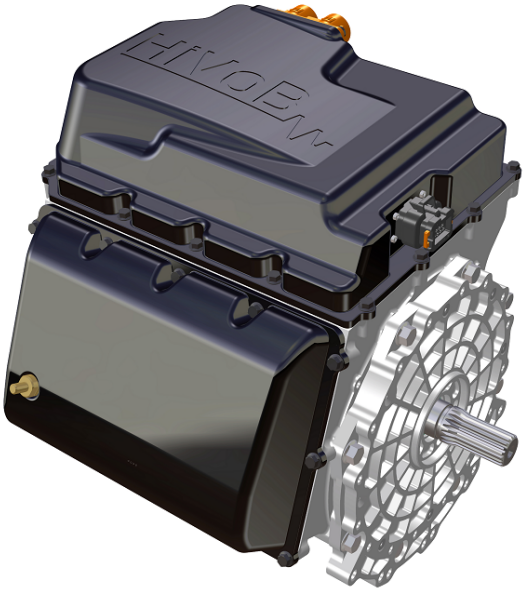
IFPEN développe un ensemble de briques technologiques permettant au système développé de répondre à la grande variété de cahiers des charges visés par la mobilité. Ces briques concernent aussi bien le moteur en se focalisant notamment sur **ses parties actives (rotor, stator et bobinage)**, **l'électronique de puissance**, **le système de refroidissement** permettant de compacter l'ensemble, que l'intégration mécanique et mécatronique à volume contraint et minimisant l'impact sur le cycle de vie du produit. Ces technologies sont développées dans le cadre de projets collaboratifs menés d'une part au sein des écosystèmes français et européen de la recherche avec de nombreux grands acteurs publics et privés, d'autre part avec des PME et des startups pour les marchés de petite et moyenne série.

Parmi toutes les technologies de motorisations électriques existantes, IFPEN a focalisé son développement sur le moteur synchro-reluctant assisté d'aimants avec ou sans terres rares. Ce dernier possède un quadruple avantage :

- en exploitant le phénomène de reluctance, il utilise moins d'aimants, que les moteurs synchrones à aimants permanents,
- cette caractéristique lui donne un avantage en termes de coût de production et d'impact environnemental,
- il offre une large plage de rendement élevé par rapport aux moteurs du marché lui permettant d'optimiser l'utilisation de l'énergie et réduire la taille de la batterie du véhicule,
- et cette topologie est propice à l'exploitation efficiente à haute vitesse, ce qui lui donne un avantage de densification de puissance et la réduction de la taille du système de propulsion

Sur la base de cette technologie, IFPEN a développé trois gammes de puissance, destinées soit à des petites séries, soit au rétrofit de véhicules thermiques :

- moins de 60 V / 40 kW
- entre 60 V / 40 kW et 350 V / 150 kW
- entre 350 V / 150 kW et 800 V / 300+ kW



Moteur électrique synchro-réluctant Hivob

Une technologie performante : les moteurs électriques synchro-réluctants
Les équipes d'IFPEN ont choisi de développer la technologie de motorisation électrique synchro-réluctante pour répondre à deux défis majeurs :
• développer un moteur très performant, modulaire et robuste vis-à-vis des conditions d'utilisation extrêmes ;
• identifier le compromis performance / coût / fabricabilité le plus attractif pour les marchés des petites séries.
Cette approche nécessitant un pilotage en couple du moteur plus avancé et complexe pour compenser la faible quantité d'aimants, IFPEN a développé des lois de commande adaptées très performantes.
L'efficacité d'un moteur synchro-réluctant dépend beaucoup de la conception des parties actives (rotor, stator). C'est pourquoi IFPEN a développé des outils de conception par optimalité système et une technologie propriétaire pour ces parties actives de manière à en optimiser les performances par rapport à l'état de l'art tout en minimisant les coûts.

Des machines électriques économes en terres rares et à forte recyclabilité

Les terres rares utilisées dans les aimants des parties actives des moteurs électriques sont des matériaux critiques qu'il est important d'économiser et de recycler. Deux stratégies principales concourent à cet objectif. En premier lieu, les outils de conception IFPEN permettent d'**optimiser la conception des parties actives**, et notamment **du rotor**, de manière à **réduire la quantité d'aimants, et donc de terres rares**. Pour certaines applications en particulier, une vision système permet même de s'en affranchir, en utilisant notamment des aimants à base de ferrites de formes non prismatiques : cela est possible en optimisant le groupe motopropulseur dans son ensemble, intégrant le moteur électrique d'abord mais aussi l'électronique de puissance et le réducteur mono ou bi-vitesse.
En parallèle, des efforts de conception sont réalisés pour faciliter **la collecte en fin de vie des matériaux stratégiques**. Des technologies innovantes pour la fabrication des aimants permanents

sont aussi développées pour économiser la matière première, comme **le moulage par injection de poudre** (MIP : powder injection molding en anglais).

Motorisations électriques performantes et économie de matière

IFPEN conçoit des motorisations électriques performantes intégrant une électronique compacte et une solution originale de refroidissement du moteur. Ces technologies se déclinent sur un large spectre d'applications, du petit véhicule faible tension aux véhicules demandant de fortes puissances.

Par ailleurs, ces moteurs intègrent **la problématique de la recyclabilité et de l'économie de matière**. Ainsi, le projet MELCHIOR, mené en collaboration entre les deux Carnot IFPEN Transports Energie et CEA Energies du Futur de 2022 à 2023, a consisté à concevoir et à mettre au point un moteur électrique synchro-réluctant dont les parties actives permettent une réduction de la quantité d'aimants pour une puissance donnée (125 kW/kg d'aimant, soit + 40 % par rapport à l'état de l'art) et rendent possible la collecte en fin de vie des aimants pour réduire les pertes de matières, contribuant ainsi à lever les verrous de la filière de recyclage. La suite du projet MELCHIOR a pris forme dans le cadre du projet Européen Magellan associant les deux Carnot au partenaire industriel Orano pour aller encore plus loin dans le domaine de la production des aimants permanents européens et du recyclage de matériaux critiques essentiels à la fabrication des moteurs électriques.

Un lien étroit avec le tissu des PME

IFPEN s'associe avec des PME pour la conception et la fabrication des moteurs.

Ainsi, un partenariat a été noué avec la PME Solution F (du groupe GCK) pour développer **de nouvelles générations de motorisations électriques compactes et à très forte puissance spécifique** pour équiper différentes catégories de véhicule, comprenant des modèles de compétition, des voitures particulières, des poids lourds et des véhicules off-road. Le directeur de Solution F, Vincent Lallemand, témoigne : « Nous avons d'abord adapté la technologie IFPEN de moteurs synchro-réluctants assistés par aimants pour le rétrofit électrique de la voiture de collection Lancia Delta HF Intégrale. Ensuite, cette technologie a été élargie à des motorisations à très haute tension (800 V) pour des dameuses, et en basse tension (48 V) pour des véhicules de loisirs et pour l'hybridation en rétrofit de voitures légères citadines. Cette technologie est différenciante et stratégique pour notre groupe. Elle permet à nos technologies de traction électrique d'avoir une longueur d'avance, que ce soit pour permettre le rétrofit de véhicules thermiques ou pour produire en petite série des voitures électriques très performantes et haut de gamme. »

Un autre partenariat a été initié en 2023 avec la société MOV'NTEC des Hauts-de-France pour mettre au point et industrialiser une gamme de moteurs électriques optimisés en termes de rendement, de volume et de masse et à faible empreinte environnementale (approvisionnement local, zéro déchet en fabrication, réparables en cours de vie et recyclables en fin de vie).

CONCEPTION D'UNE ARCHITECTURE NOVATRICE : MACHINE À FLUX AXIAL

Dans le domaine des machines électriques, IFPEN explore d'autres voies technologiques que la machine synchro-reluctante, dans le but d'améliorer significativement la densité de couple.
Dans le cadre du projet ANR RedHat, coordonné par le laboratoire LSEE, les équipes d'IFPEN et de ses partenaires ont conçu **un moteur à flux axial très performant développé sur la base d'une topologie double stator / simple rotor**. Ce projet vise à maximiser les performances de la machine, en mettant en œuvre plusieurs innovations sur la gestion thermique du stator et du rotor. Dans cet objectif, le projet utilise des nouveaux matériaux dont des isolants inorganiques pour le bobinage ; ceux-ci sont capables de résister en régime permanent à des températures sensiblement plus élevées que celles supportées par des isolants à base de polymères organiques standards.
IFPEN a fourni des modélisations 3D avancées, couplées à des outils d'optimisation, pour le dimensionnement des circuits magnétiques et pour l'estimation de la distribution des contraintes thermiques et mécaniques au sein du moteur. Il a également mis en place des modèles pour valider le niveau de déformation mécanique du rotor sous l'effet des forces électromagnétiques, ainsi que l'efficacité du système de refroidissement du stator et du rotor.



Moteur à flux axial

NOUVELLES GÉNÉRATIONS D'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

IFPEN développe des convertisseurs d'électronique de puissance qui assurent plusieurs fonctions : **pilotage des moteurs électriques**, **gestion de l'énergie à bord du véhicule** ou encore **contrôle de la recharge de la batterie**. Ouverts, robustes, polyvalents, ils accompagnent les développements sur les moteurs et leur pilotage.
Ces convertisseurs d'énergie électrique utilisent des transistors à base de matériaux WBG (Wide Band Gap) comme le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN).

La rupture technologique introduite par les composants WBG s'accompagne de défis majeurs auxquels s'attaque IFPEN :

1) Compréhension et caractérisation des composants WBG (Wide Band Gap) au sein d'un

système électrique

Pour comprendre l'impact de ces nouvelles technologies et mieux cerner leurs mécanismes de vieillissement qui peuvent diminuer les performances des convertisseurs électriques, IFPEN collabore à des projets européens (i.e. ARCHIMEDES) et a noué des partenariats spécifiques. Ainsi, IFPEN s'est associé en 2023 avec Cambridge GaN Devices (CGD), spécialiste des semi-conducteurs proposant une gamme de composants à large bande GaN et haute efficacité énergétique, dans le but de développer **un onduleur innovant pour la mobilité électrique sur la base de dispositifs GaN avancés**.

2) Nouvelles topologies

Les topologies de puissance jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la durabilité des systèmes électriques, en optimisant l'efficacité énergétique et en prolongeant la durée de vie des composants. IFPEN propose des architectures novatrices pour exploiter efficacement les composants WBG, tout en augmentant les densités de puissance massique et volumique des convertisseurs : dans ce contexte, IFPEN participe au projet européen EMPOWER où un **onduleur à très forte puissance massique et volumique** est développé, pour des applications Poids Lourds.

3) Gestion thermique et nouvelles solutions de refroidissement

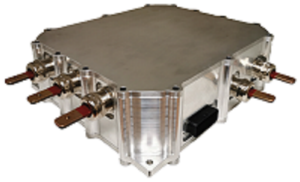
L'utilisation à leur plein potentiel des composants WBG peut générer localement des pertes de puissance de l'ordre de 1 kW/cm2, c'est-à-dire dix fois supérieures à celles des puces à base de Silicium (Si). IFPEN explore **de nouvelles solutions de refroidissement localisées de la puce semiconductrice**, en s'attachant notamment à une meilleure compréhension du comportement thermique des composants implémentés au sein des cartes électroniques.

Des convertisseurs d'électronique de puissance à base de composants WBG

Sur la base de composants WBG, IFPEN développe avec ses partenaires des convertisseurs d'électronique de puissance adaptés à différents usages. Ainsi, sur la base des composants SiC, deux onduleurs ont été mis au point : HivoSic, un onduleur triphasé 800 V SiC polyvalent pour les applications sur banc d'essai, et TwinSic, un onduleur SiC très haute puissance pour véhicules électriques. Un module de puissance demi-pont à base de composants ICeGaN de CGD a également été développé. Il constitue la brique élémentaire d'un onduleur de traction de nouvelle génération en technologie GaN.



HivoSic



TwinSic

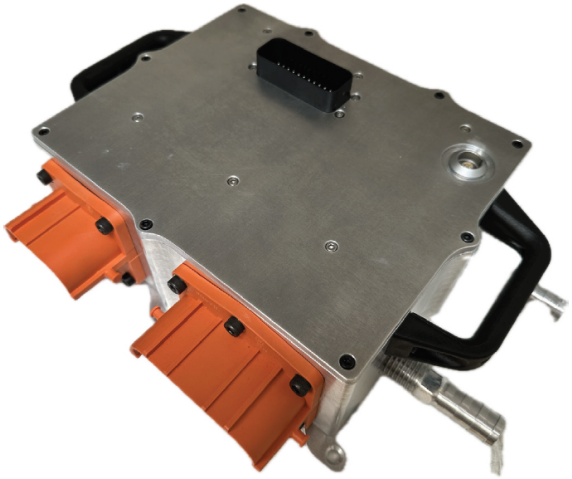


Onduleur à base de GaN

Des liens forts avec des PME pour mettre au point et diffuser de nouvelles technologies
IFPEN s'associe avec des PME pour la conception, la fabrication et la commercialisation de l'électronique de puissance pour des moteurs électriques. La recherche de partenaires est facilitée par des associations d'entreprises telles que le cluster CARA qui fédère 430 industriels, opérateurs de transports, centres de recherche et de formation dans la région Auvergne Rhône Alpes.
Ainsi, un partenariat a été établi avec la société lyonnaise Alphée Développement pour commercialiser l'onduleur très haute puissance HivoSiC.
Par ailleurs, IFPEN, dans le cadre de sa collaboration avec la PME Solution F (groupe GCK) sur le développement d'un moteur synchro-réluctant basse tension (48V) destiné aux véhicules de loisir et à l'hybridation en rétrofit de voitures légères citadines, a fait bénéficier Solution F d'une licence d'exploitation d'un onduleur basse tension en rupture en termes de puissance continue qui assure le pilotage optimal de ce moteur.

Onduleur compact pour le pilotage de compresseur de pile à combustible

IFPEN a mis au point une électronique de puissance compacte et modulaire en puissance et en tension (8 et 30 kW), ainsi que les algorithmes de contrôle associés, pour piloter une nouvelle génération de compresseurs d'alimentation en air pour piles à combustible hydrogène (PEMFC). Cette modularité a été offerte par une conception et une intégration innovante des composants SiC en boîtier discret, rendant cette technologie économiquement viable pour cette gamme d'applications.



Onduleur SAMI à base de SiC pour applications piles à combustible

PILOTAGE DES MACHINES ÉLECTRIQUES

IFPEN développe des stratégies de contrôle avancé dédiées au pilotage des machines électriques. Ces stratégies ou lois de commande sont conçues et validées dans un environnement de développement spécifique propriétaire (eDrive Control Suite) qui génère de manière automatique le code destiné à être intégré dans les électroniques de pilotage (onduleurs). Cet environnement permet de concevoir et calibrer les algorithmes nécessaires au pilotage précis des machines électriques tournant à haute vitesse, caractérisées par une fréquence électrique élevée. L'adaptation du logiciel de contrôle à chaque application ciblée suit un processus rodé sur plusieurs années, s'appuyant sur la simulation ou la caractérisation expérimentale. Les logiciels ainsi mis au point en seulement quelques jours sont embarqués dans une carte de contrôle, partie intégrante de tous les onduleurs développés et réalisés par les équipes d'IFPEN. L'association d'algorithmes performants rapidement déployés avec des systèmes électroniques compacts caractérisés par des faibles pertes, permet d'exploiter pleinement le potentiel des machines électriques de nouvelle génération conçues par IFPEN ou ses partenaires industriels.

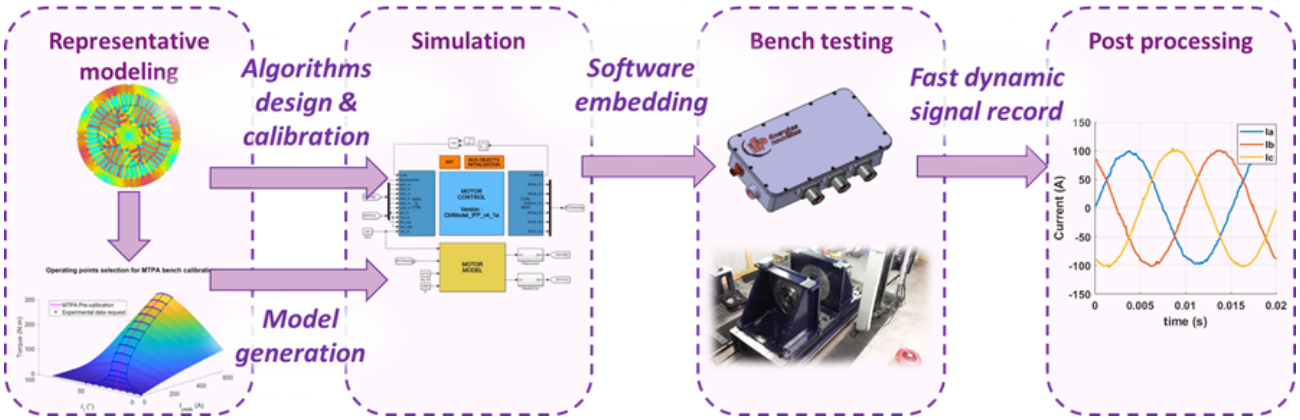


Schéma de la mise en œuvre et de la validation des algorithmes de contrôle

Les stratégies développées permettent un fonctionnement à rendement optimal dans toutes les conditions, d'optimiser le bruit par l'injection de vibrations en interférence destructrices, d'optimiser le compromis entre les pertes moteurs et onduleur, etc.

Ces stratégies de contrôle avancées ont été expérimentées dans le cadre de plusieurs projets collaboratifs, dont le projet CORAM Olea-Evo mené avec Silicon Mobility, PME spécialisée en semiconducteurs et en logiciels embarqués. Les travaux visent à augmenter l'autonomie des véhicules électriques en réduisant les pertes dans l'onduleur et le moteur électrique grâce à la mise en œuvre d'algorithmes de contrôle innovants. Les équipes d'IFPEN ont développé des modèles avancés pour estimer ces pertes et ainsi permettre leur optimisation par le contrôle. Le projet CORAM Mautiv'8, mené avec Punch Powertrain France, un fabriquant d'électroniques de puissance en grande série, se focalise sur la réduction par le contrôle des perturbations électriques liées à l'utilisation de transistors SiC. Enfin, IFPEN collabore aussi directement avec des équipementiers de rang 1 et des constructeurs automobiles pour évaluer la pertinence de ses solutions innovantes de pilotage.

DES INNOVATIONS AU SERVICE DE LA MOBILITÉ LÉGÈRE ET DE LA MOBILITÉ DOUCE

IFPEN accompagne la diffusion de la mobilité légère et en particulier du vélo électrique en créant des services digitaux et en proposant des solutions techniques innovantes.
Ainsi, IFPEN a développé des algorithmes de prédiction de la décharge pour aider le cycliste à gérer efficacement la batterie.
IFPEN conçoit par ailleurs des systèmes de transmission automatique pour les vélos à assistance électrique (VAE) ou encore les quadricycles légers. Ainsi, le concept de transmission innovant pour VAE, qui adapte automatiquement le rapport engagé et supprime le dérailleur et la cassette de pignons, est en cours de valorisation.



Transmission automatique pour vélos à assistance électrique

CONTACTS



Gaetano de Paola
Responsable du programme « Propulsion électrique »

gaetano.de-paola@ifpen.fr



Innovation et industrie

Actualités septembre 2023

Machines électriques et aimants recyclables : des technologies de pointe pour économiser la matière

Mobilité électrifiée



Innovation et industrie

Actualités décembre 2022

Mobilité électrique : IFPEN et CGD s’associent pour développer des onduleurs de dernière génération

Communiqués de presse

Mobilité durable Mobilité électrifiée



Innovation et industrie

Actualités

octobre 2021

Mobilité hydrogène : IFPEN se dote du banc d’essai de piles à combustible le plus puissant de France

Communiqués de presse

Hydrogène

Mobilité durable

Mobilité électrifiée

Mobilité électrifiée : Nos solutions

Lien vers la page web :