

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2020

INNOVER
LA MOBILITÉ



CARNOT

IFPEN TRANSPORTS ENERGIE





Pages

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

- LA MOBILITÉ ÉLECTRIFIÉE EN CROISSANCE CONTINUE
- AU SERVICE DE LA MOBILITÉ CONNECTÉE
- LES MOTORISATIONS THERMIQUES EN MUTATION

11

LES PROJETS CARNOT FILIÈRES :

- CARNAUTO
- AIRCAR

12

GRAND ANGLE :

ÉMISSIONS DES VOITURES ESSENCE ET DIESELS RÉCENTES :
PUBLICATION DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR LE CARNOT IFPEN TE
POUR LE MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

14

RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE

21

**PROFESSIONNALISATION ET DÉVELOPPEMENT
DE PARTENARIATS SOCIO-ÉCONOMIQUES**

26

OUVERTURE INTERNATIONALE

28

SALONS ET MANIFESTATIONS 2020

29

SÉLECTION DE PUBLICATIONS

LE MOT DU DIRECTEUR



Avant de connaître un bouleversement sanitaire et économique sans précédent, l'année 2020 a démarré avec le renouvellement, pour la troisième fois consécutive, de la labellisation Carnot des activités transports et énergie d'IFPEN. Je tiens avant tout à remercier les équipes du Carnot IFPEN Transports Energie (IFPEN TE) pour leur mobilisation et je partage leur fierté à pérenniser ce label d'excellence.

Tout au long de l'année, les projets conduits par les équipes du Carnot se sont inscrits dans une accélération de la transition du secteur de la mobilité où le risque climatique devient de plus en plus pressant et où la qualité de l'air en

zone urbaine est au cœur des préoccupations des citoyens. À travers nos trois axes de recherche, la mobilité électrifiée, la mobilité connectée et la mobilité à faible impact environnemental, nous avons poursuivi notre engagement à proposer des solutions au service de l'efficacité énergétique des transports, de l'amélioration de la performance environnementale des motorisations et de la diversification des sources d'énergie dans l'optique d'une mobilité propre et décarbonée, de plus en plus connectée et évoluant vers une logique de services, répondant aux attentes sociétales.

En 2020, grâce à la motivation de chacun, nous avons répondu présents aux défis d'une année au contexte inédit. Le Carnot IFPEN TE s'est ainsi engagé sur les questions de mobilité liées à la crise sanitaire, en participant à la création du collectif «Mieux comprendre l'impact de la Covid-19 sur la mobilité à Paris et en Île-de-France».

Nous avons pris part au soutien à la filière industrielle dans le cadre du plan de relance automobile en nous inscrivant dans le développement de la filière hydrogène en France. Nous avons notamment accéléré la R&I autour du moteur thermique hydrogène, une technologie de transition apportant une solution de mobilité sans émissions de CO₂ pouvant être mise en œuvre à court/moyen terme et à moindre coût. Nous avons également ciblé nos investissements sur des bancs d'essais à hydrogène, tant pour des applications Pile à combustible que pour des applications Moteur thermique. Les années à venir verront monter en puissance le Carnot IFPEN TE sur le sujet.

Au service des pouvoirs publics et forts de notre expertise dans la réalisation d'études techniques ou technico-économiques, l'élaboration de scénarios ou d'outils d'aide à la décision, nous avons réalisé à la demande du ministère de la Transition écologique une étude scientifique d'évaluation des émissions polluantes et de gaz à effet de serre de l'offre actuelle de véhicules essence et diesels (Euro6d-Temp). Les analyses ont été effectuées à l'aide du système de mesure embarqué Real-e développé avec la PME Capelec. Les résultats ont été publiés fin 2020 sur le site www.ifpenouvelles.fr

Les projets collaboratifs à financement public ont également été en 2020 un enjeu majeur pour le Carnot IFPEN TE. Le programme-cadre européen reste une cible privilégiée et les efforts engagés depuis longtemps au sein des associations européennes se sont poursuivis. Outre le démarrage des deux projets acceptés fin 2019 (*voir page 26*), deux nouveaux projets ont été acceptés en 2020, dont un que nous pilotons.

Enfin, la transition digitale engagée depuis plusieurs années et notre adaptabilité ont permis, à travers des salons et manifestations qui se sont tenus dans des formats innovants, de poursuivre notre politique de soutien aux PME et ETI, notamment dans le cadre des actions filières Carnauto et Aircar.

Je vous invite à découvrir, dans ce bilan de l'année 2020, le détail des avancées du Carnot IFPEN Transports Energie. Bonne lecture !

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, du transport 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, articulée autour de quatre orientations stratégiques : climat, environnement et économie circulaire – énergies renouvelables – mobilité durable – hydrocarbures responsables.

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 transition écologique. 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, de l'énergie et de l'environnement.

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.

UN FINANCEMENT PUBLIC/PRIVÉ

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

LA CRÉATION DE VALEUR

IFPEN contribue à la création de richesse et d'emplois, en soutenant la compétitivité des acteurs industriels et en favorisant le développement économique des filières liées aux secteurs de la mobilité, de l'énergie, de l'environnement et des éco-industries. Le modèle d'IFPEN repose sur la valorisation industrielle des technologies développées par ses chercheurs. La mise sur le marché des innovations se fait au travers de partenariats étroits avec des industriels et via les filiales de son groupe. 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 décerne ainsi un diplôme tous les ans à plus de 500 étudiants issus du monde entier.



LE CARNOT IFPEN TRANSPORTS ENERGIE EN BREF



Le Carnot IFPEN Transports Energie apporte à ses partenaires industriels des produits et services innovants et compétitifs dans trois domaines : mobilité électrifiée, mobilité connectée et mobilité à faible impact environnemental.

Au sein d'IFPEN, il répond aux défis actuels de la mobilité : évolution des usages appuyée par la digitalisation, amélioration de l'efficacité énergétique, diversification des énergies et réduction des nuisances.

Innover grâce à :

- des solutions répondant aux besoins du marché : systèmes de motorisations électrifiées, services web, systèmes de motorisations thermiques intégrant les carburants bas carbone, systèmes mobiles ou stationnaires de production et de stockage d'énergie et de récupération d'énergie perdue pour le transport ou les installations de petite puissance ;
- des moyens expérimentaux et des outils numériques performants permettant de proposer des innovations à coûts et temps de développement réduits ;
- une politique volontariste de protection industrielle.

Valoriser à travers :

- un accompagnement des filières industrielles sur un champ très large de niveaux de maturités technologiques (TRL 2 à 9) ;
- un transfert de ses résultats R&D via des codéveloppements de produits avec cession de licence d'exploitation, des partenariats stratégiques ou des contrats de recherche collaborative ;
- une politique de soutien de l'innovation, particulièrement auprès des TPE, PME et ETI.

Collaborer avec :

- des start-up, TPE, PME, ETI jusqu'aux grands groupes industriels français et internationaux ;
- les pôles de compétitivité (Mov'eo, Cara, ASTech, etc.) ;
- les projets « filières industrielles » Carnot : le Carnot IFPEN Transports Energie est coordinateur de Carnauto pour l'automobile et partenaire d'Aircar pour l'aéronautique ;
- des réseaux de partenaires académiques et des laboratoires de R&D au rayonnement international ;
- les instances européennes représentatives de la recherche et de l'industrie (EARPA, ERTRAC, EGVA, POLIS).

Des expertises et compétences de pointe parmi lesquelles :

- modélisation 3D, diagnostics avancés et compréhension de la combustion ;
- nouvelles technologies de motorisations thermiques et intégration véhicule ;
- stratégies de contrôle, contrôle embarqué et simulation temps réel ;
- aide à la conduite et gestion de flottes de véhicules ;
- traitement du signal ;
- algorithmes d'optimisation, science des données ;
- systèmes de stockage d'électricité ;
- etc.

Le Carnot IFPEN Transports Energie en 2020, c'est :

54 contrats en cours pour un panel de 24 entreprises

22 projets de recherche collaborative auxquels contribuent 109 entreprises partenaires

Un personnel de 310 ETP

Plus de 30 doctorants, dont 2 en thèses Cifre

33 brevets déposés dans l'année et 266 détenus dans le portefeuille de brevets

Une vingtaine de publications de rang A

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

L'urgence climatique et environnementale impose une mobilisation d'ampleur autour des enjeux de la mobilité durable. Pour accompagner la prise de décisions des collectivités pour leurs plans de mobilité, soutenir les citoyens dans leurs démarches écoresponsables et aider les entreprises dans leur développement d'innovations de rupture, le Carnot IFPEN Transports Energie explore trois pistes technologiques : la mobilité électrifiée, la mobilité connectée et la mobilité à faible impact environnemental.



La mobilité électrifiée en croissance continue

L'électrification des véhicules est en fort essor. Élément clé pour réduire significativement les émissions de CO₂ des transports et améliorer la qualité de l'air à l'échelle locale, elle s'appuie sur différentes solutions allant de l'hybridation légère jusqu'au tout électrique. Les travaux du Carnot IFPEN TE ont pour objectif de mettre au point des systèmes électriques performants et énergétiquement efficaces. Ils portent sur le développement de machines électriques innovantes, de leur électronique de puissance et système de contrôle associés, ainsi que sur l'électrification de fonctions du groupe motopropulseur. IFPEN conçoit également des technologies de récupération de l'énergie thermique perdue. Dans le domaine des batteries, IFPEN s'intéresse au comportement des systèmes ainsi qu'aux mécanismes de vieillissement et d'emballage thermique en ciblant notamment les futures générations de batteries. En 2020, la solution alternative de l'utilisation de l'hydrogène dans le transport, et plus spécifiquement de la pile à combustible (PaC) a été étudiée par le Carnot IFPEN TE dans une approche systémique au travers de travaux de simulation. Des enjeux technologiques forts ont été identifiés et ont conduit au lancement d'un projet de recherche ainsi qu'à des investissements destinés à répondre aux besoins des pouvoirs publics et des industriels.

Fait marquant

Une suite logicielle au service de l'optimisation du design des machines électriques

Les équipes du Carnot IFPEN TE, en collaboration avec d'autres équipes d'IFPEN, ont développé e-Mod Tools (*electric Motors Optimal Design Tools*), une suite logicielle d'optimisation du design des machines électriques.

L'outil permet de générer un grand nombre de solutions virtuelles puis de proposer un concept conciliant des contraintes multiples (coût, volume, masse, performances, etc.) notamment sur les parties actives du moteur (rotor et stator). Il intègre également des fonctions d'automatisation permettant un gain de temps sur l'ensemble du processus de conception.



Fait marquant

Demobase : améliorer l'efficacité et la sécurité des batteries

Le projet H2020 Demobase (*DEsign and MOdelling for improved BAttery Safety and Efficiency*) qui avait pour objectif d'accompagner le développement de la mobilité électrique en réduisant les efforts de développement des chaînes de traction électrique s'est achevé fin 2020. Coordonné par le fabricant de batteries Saft, il devait améliorer leur efficacité de 20 % et augmenter significativement leur sécurité. Dans le cadre de Demobase, les équipes du Carnot IFPEN TE ont mené des travaux de modélisation relatifs à la sécurité des batteries et ont notamment développé des modèles de batteries prenant en compte l'emballage thermique. Elles ont également mis en place différents outils expérimentaux sur les bancs batteries d'IFPEN, comme un dispositif de vieillissement à haut débit ou encore un dispositif HIL (*Hardware in the Loop*) basé sur un simulateur véhicule sous le logiciel Simcenter Amesim.



PROJET MODALIS²



Début 2020 le projet H2020 Modalis² "MODelling of Advanced LI Storage Systems" a été lancé pour trois ans. Porté par le Carnot IFPEN TE aux côtés de neuf autres partenaires académiques et industriels (le centre de recherche de Fiat, Digital Industry Software, Gemmate Technologies, K&S, Saft, Siemens Corporate Technologies, Solvay, l'université de Turin et Umicore) Modalis² vise à développer une chaîne d'outils numériques permettant de modéliser et de concevoir des systèmes de batteries utilisant de nouveaux matériaux comme les alliages avec du silicium pour les électrodes négatives, les électrolytes solides, etc. Par cette nouvelle approche de modélisation, les coûts de développement des batteries, ainsi que des matériaux qui les composent, pourraient être réduits de 20 à 35 %. En réduisant le temps de mise sur le marché des batteries de nouvelle génération, il est possible de baisser de manière significative leur prix de revient. C'est ce défi que nous cherchons à relever à travers Modalis², avec la perspective que ce projet vienne renforcer l'industrie européenne de la production de batteries.



Martin Petit, Ingénieur de recherche et coordinateur du projet

Fait marquant

Aide au transport de charges lourdes en milieu hospitalier : premiers prototypes pour OwlOne™

OwlOne™ est l'aboutissement de l'un des six projets lauréats du challenge d'innovation interne à IFPEN sélectionnés en avril 2018. Il vise à apporter une réponse aux enjeux de la mobilité des charges lourdes en milieu hospitalier afin de diminuer les troubles musculo-squelettiques du personnel. À la suite de l'élaboration d'un modèle économique et de l'analyse de l'offre marché, l'année 2020 a permis la concrétisation d'une présérie de cinq prototypes. La prochaine étape consistera en la création d'une entreprise qui portera cette solution innovante sur le marché.



Fait marquant

Créez vos propres apps mobilité grâce à xDash™ !

xDash™ est une plateforme logicielle en open access développée par les équipes du Carnot IFPEN TE qui offre aux chercheurs non développeurs la possibilité de bâtir facilement leurs propres applications web. Conçu à l'origine pour le développement d'applications web liées à la mobilité, xDash™ est désormais adapté à tout type de besoin. Les utilisateurs bénéficient des algorithmes IFPEN ou d'autres organismes dans les domaines de la météo, du trafic routier, de la Covid, etc. Afin de répondre aux besoins des ingénieurs et scientifiques, xDash™ a été doté en 2020 de la possibilité d'y écrire ou d'y importer directement du code Python, langage très utilisé dans la science des données. Par ailleurs, hébergé en mode SaaS sur les serveurs Azure de Microsoft, il peut être déployé en toute conformité avec les règles de sécurité qu'exigent les logiciels de type SaaS et s'interfacer avec des webservices clients.



Au service de la mobilité connectée

Le Carnot IFPEN TE exploite depuis plusieurs années le potentiel offert par le digital pour réduire l'impact environnemental des transports. Deux familles de webservices émergent. L'une propose des indicateurs d'analyse de trajet : énergie, émissions polluantes, sécurité, etc. La deuxième permet d'analyser un grand nombre de trajets afin de créer des indicateurs agrégés et rapportés à un référentiel géographique ou à un segment d'usage. Ainsi, de nombreuses applications ou produits utilisent ces webservices développés par le Carnot, comme Geco™ air, outil d'analyse de la conduite et d'amélioration de la mobilité via les données des smartphones ; Geovelo™, GPS vélo qui va jusqu'à qualifier l'infrastructure cyclable à l'aide du smartphone du cycliste ; ou encore Galuchon, le sac à dos connecté de Galanck. Les équipes du Carnot IFPEN TE développent également, au travers de plusieurs projets européens et grâce à leur expertise en contrôle et en développement d'algorithmes, des services connectés d'eco-routing, pour trouver la route la plus rapide et la moins énergivore, et des solutions d'eco-driving pour réduire, par son style de conduite, l'énergie consommée. LongRun fait partie des projets européens lancés en 2020. Le Carnot en pilote le lot poids lourd connecté avec la mise en place d'un cloud transverse pour l'ensemble des prototypes véhicules (voir ci-dessous).

EN ROUTE VERS LES NOUVELLES MOBILITÉS : LE CARNOT IFPEN TE AU SERVICE DU CITOYEN ET DES COLLECTIVITÉS

La crise de la Covid-19 a modifié les habitudes de déplacement. En mai, l'annonce d'un plan vélo gouvernemental a dynamisé la transition vers les mobilités douces. Les pistes cyclables s'étendent dans les territoires et le Carnot accompagne le mouvement. Avec une quinzaine d'autres acteurs impliqués dans la mobilité en Île-de-France et réunis au sein du collectif « Mobilité Île-de-France - impact de la Covid-19 », il analyse ces changements via une grande enquête auprès des Franciliens. Par ailleurs, la solution Geovelo™, mise à disposition des villes et des usagers, a pris de l'ampleur. Outre le calcul d'itinéraires, Geovelo™ permet de qualifier l'infrastructure cyclable d'un territoire à l'aide du smartphone du cycliste. Les données recueillies sont traitées, enrichies et cartographiées par les webservices développés par le Carnot. Le cycliste est informé des évolutions des pistes qu'il emprunte habituellement. L'ensemble des données anonymisées des utilisateurs sont ensuite agrégées afin d'obtenir une vision de l'usage du vélo à l'échelle d'une ville ou d'un territoire.

Fait marquant

Amélioration de la chaîne de traction de poids lourds grand routier : lancement du projet européen LongRun

Le projet LongRun (*Development of efficient and environmental friendly LONG distance powertrain for heavy duty trucks and coaches*) a été lancé en janvier 2020 dans le cadre du programme européen Horizon 2020. Ce projet, qui durera trois ans et demi, est mené avec 30 partenaires – les principaux équipementiers de camions et d'autocars, ainsi que leurs fournisseurs et partenaires de recherche – répartis dans 13 pays. Le but est de développer un ensemble complet de chaînes de traction pour poids lourds et autocars plus respectueux de l'environnement, en visant les objectifs suivants : 10 % d'économie d'énergie, 30 % de réduction des émissions de polluants et un pic de rendement thermique à 50 %. Les équipes du Carnot IFPEN TE apporteront notamment leurs compétences sur la conception et la caractérisation de systèmes de combustion pour carburants à faible impact CO₂ (gaz naturel, hydrogène, dual fuel, biocarburants), ainsi que sur le développement de services connectés d'eco-routing et d'eco-driving pour réduire l'énergie consommée. LongRun contribuera également à établir des feuilles de route sur la technologie du groupe motopropulseur et de la chaîne de traction et sur les futurs carburants à faible impact CO₂, pour alimenter les réflexions de la Commission européenne et orienter les futurs programmes de R&D.



Les motorisations thermiques en mutation

Les travaux conduits par le Carnot IFPEN TE en 2020 offrent une vision globale de ce que sera le futur moteur très haut rendement. En effet, pour atteindre les objectifs ambitieux en matière d'émissions polluantes et de CO₂ d'ici à 2030, l'amélioration des motorisations thermiques en complément de l'électrification est indispensable. Le Carnot IFPEN TE mène des recherches afin d'augmenter leur rendement et de réduire les émissions de polluants. Ses travaux consistent également à identifier les carburants bas carbone (gaz naturel, biocarburant, e-fuels, hydrogène) présentant les bilans énergétiques et environnementaux les plus favorables, et à optimiser leur utilisation dans les moteurs. Le Carnot a ainsi développé le système de combustion Swumble™ de deuxième génération. Mis au point en 2020 sur un moteur automobile représentatif des futures solutions industrielles, il démontre une très bonne aptitude à fonctionner en mélange fortement dilué, soit en restant à la stoechiométrie avec la recirculation des gaz d'échappement (EGR), soit en mélange pauvre. Le Carnot IFPEN TE porte également plusieurs projets dans le cadre du programme Horizon 2020 comme le projet Eagle (voir ci-contre). Le nouveau programme européen Phoenix, piloté par le Carnot IFPEN TE avec l'objectif de développer une chaîne de traction optimisée pour un véhicule léger hybride plug-in, offrira, quant à lui, une approche innovante en termes d'aérodynamique interne, de systèmes d'allumage et d'injection, permettant des combustions fortement diluées par l'air et/ou l'EGR. Par ailleurs, après avoir confirmé par calcul l'intérêt d'une motorisation thermique hydrogène par rapport à une pile à combustible sur plusieurs segments de marché, un premier assemblage technologique a été mis en oeuvre sur un banc monocylindre. L'objectif est de valider les outils de modélisation, d'avoir des premiers retours sur l'impact de la combustion sur l'usure des pièces ou du lubrifiant et de confirmer le potentiel en rendement, combiné à de très faibles émissions de polluants à la source.

Fait marquant

Le projet de recherche européen Eagle ouvre la voie à un moteur à essence haut rendement

Le projet Eagle « *Efficient Additivated Gasoline Lean Engine* », coordonné par le Carnot IFPEN TE et mené avec huit partenaires* s'est clôturé début 2021. Il visait à développer un moteur à allumage commandé essence pour une application hybride permettant des pics de rendement de 50 % tout en réduisant les émissions. Plusieurs technologies d'avant-garde, telles que l'injection d'hydrogène, un système d'allumage en préchambre pour mélanges ultra-pauvres et le recours à de nouveaux matériaux de revêtement intelligents pour l'isolation thermique, ont été évaluées expérimentalement et ont montré des résultats prometteurs. Les tests réalisés sur le moteur multicylindre Renault ont par ailleurs validé le système électrifié innovant de suralimentation à double étage et clarifié la compréhension du système de post-traitement nécessaire à l'obtention de très faibles émissions de polluants dans les gaz d'échappement.

*Renault, Vitesco Technologies (Allemagne et France), FEV Europe GmbH, Saint-Gobain, aux côtés des universités de Naples, d'Aix-la-Chapelle et de Valence.

Focus

Le moteur à combustion interne à hydrogène constitue une solution contribuant à atteindre une mobilité propre et décarbonée dans la mesure où la combustion de l'hydrogène ne produit que de l'eau et de faibles quantités d'oxydes d'azote (NO_x). Il est considéré comme une alternative à la pile à combustible pour certains usages, et présente l'intérêt d'utiliser les outils industriels de production des motorisations thermiques existants. Cette solution, qui nécessite des adaptations spécifiques des motorisations pour obtenir un très haut rendement et de très faibles émissions de NO_x, fait l'objet de travaux et de tests avancés par les équipes du Carnot IFPEN TE, dont certains en collaboration avec des partenaires industriels.



ANALYSE DE LA QUALITÉ DE L'AIR : LE CARNOT IFPEN TE EN PREMIÈRE LIGNE

À l'heure où la qualité de l'air est une préoccupation forte des citoyens et un enjeu majeur de santé publique, le Carnot IFPEN TE demeure un partenaire privilégié des pouvoirs publics locaux et nationaux. Ses compétences en analyse de la qualité de l'air liée aux transports et en modélisation de la mobilité sont éprouvées et reconnues.

En 2020, les équipes ont approfondi leurs travaux de modélisation et collecte dynamique d'informations individuelles, dans le but de développer des solutions numériques d'estimation de l'empreinte environnementale de la mobilité pour le grand public.

Ces dernières enrichiront les modèles de prédiction de la qualité de l'air liée aux transports pour les territoires. Par ailleurs, en tant que référent en termes de prédiction de l'empreinte environnementale du transport terrestre, le Carnot a réalisé, à la demande du ministère de la Transition écologique, une étude scientifique destinée à évaluer les émissions polluantes et de gaz à effet de serre (GES) de véhicules récents (voir page 12). Les résultats ont été publiés fin 2020.

Pour réaliser certaines mesures, le Carnot s'est appuyé sur Real-e, l'analyseur mobile et connecté de gaz d'échappement en conditions réelles, développé en collaboration avec la PME Capelec.

Fait marquant

Avec Geco™ air, le Carnot IFPEN TE est au cœur de projets au service des territoires.

À travers les projets Airmes, Capture et Reveal, financés par l'Ademe, le Carnot améliore en continu Geco™ air, son outil web permettant d'estimer l'empreinte polluante d'une infrastructure et de fournir des cartographies de polluants liés à la route. En 2020, un nouveau projet, Acacias, a fait partie des lauréats de l'appel à propositions de recherche pour une meilleure qualité de l'air « Primequal », lancé également par l'Ademe. Acacias vise à développer de nouvelles méthodologies permettant aux villes d'identifier et promouvoir les politiques publiques liées à la mobilité les plus favorables pour l'environnement. Le projet associe aux enquêtes sur la mobilité des ménages des données de comportements collectées par Geco™ air.



MESURE ET MAÎTRISE DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS

Le Carnot IFPEN TE concentre ses travaux sur la connaissance fine des polluants et développe les moyens pour réduire leurs émissions. Parmi les différents travaux menés en 2020, citons la mise au point avec Total de plusieurs formulations d'un fluide multifonction destiné aux systèmes combinés de catalyse de dépollution d'oxydes d'azote et de filtration des particules. 2020 aura également vu l'achèvement de la phase 1 du projet Ademe Corcea Rhapsodie, qui avait pour objectif d'évaluer les émissions gazeuses et particulaires de véhicules particuliers Euro 6b et d-TEMP.

Les évaluations se sont déroulées sur banc à rouleaux IFPEN. La phase expérimentale du projet Rhapsodie 2 a démarré en septembre 2020. Pendant six mois, les émissions d'un véhicule diesel Euro 6d-ISC seront étudiées dans le but, entre autres, d'évaluer l'impact de l'introduction de différentes bases de biocarburants dans le gazole.

LES PROJETS CARNOT FILIÈRES : CARNAUTO ET AIRCAR

Le Carnot IFPEN Transports Energie poursuit sa mobilisation pour accompagner les TPE, PME et ETI dans leur démarche d'innovation dans le cadre de deux actions Carnot filières menées en collaboration avec d'autres Carnot du domaine :

- Carnauto, dédiée à la filière automobile et mobilité, en tant que coordinateur ;
- AirCar, dédiée à la filière aéronautique, en tant que partenaire.



CARNAUTO

Afin de s'adapter à la crise sanitaire qui a considérablement perturbé la tenue des challenges flash couplés aux webinars tels qu'organisés l'an passé, et soucieux de conserver ce type d'échanges avec les entreprises cibles, les neuf Carnot partenaires ont imaginé un nouveau concept. Le principe : diffuser, via la newsletter, des dossiers de veille technologique sur des thématiques d'actualité, puis mettre en place un webinar sur ce même sujet.

Ainsi, en 2020, les thématiques suivantes traitées par la filière Carnauto ont rassemblé, selon l'évènement, entre 50 et 100 participants :

- Les batteries pour les véhicules électriques ;
- La cybersécurité pour les véhicules terrestres ;
- Les véhicules connectés collaboratifs ;
- Le contexte automobile et son impact sur l'architecture matérielle et logicielle du véhicule.

Carnauto a également organisé une conférence « Cybersécurité des systèmes de transports intelligents et coopératifs » lors des Rendez-Vous Carnot 2020 qui se sont entièrement tenus au format virtuel (conférences et stands).

Pour répondre aux évolutions liées à la mobilité et anticiper les besoins futurs, Carnauto continue de faire évoluer ses plates-formes expérimentales en tenant compte de l'évolution du marché et des directives gouvernementales visant à relancer l'économie. Ainsi, en 2020, le Carnot IFPEN TE a poursuivi ses investissements sur le thème de l'électrification du véhicule, en collaboration avec une PME. Des réflexions ont également été amorcées sur l'évolution de ses moyens expérimentaux en lien avec l'utilisation de l'hydrogène (pile à combustible et moteur thermique).



AIRCAR

Le Carnot IFPEN TE poursuit son engagement envers les TPE, PME et ETI du secteur aéronautique au sein de la filière AirCar, portée par l'Onera avec sept autres Carnot.

Les activités de l'année 2020 ont principalement porté sur son positionnement vis-à-vis de la montée en puissance des solutions hydrogène dans le domaine aéronautique via une mise à jour de son offre et une adéquation de ses plateformes.

ÉMISSIONS DES VOITURES ESSENCE ET DIESELS RÉCENTES : PUBLICATION DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR LE CARNOT IFPEN TE POUR LE MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Afin de définir, en toute transparence, les performances environnementales de l'offre actuelle de voitures essence et diesels (Euro 6d-TEMP), le Carnot IFPEN Transports Energie et le ministère de la Transition écologique (MTE) ont lancé une étude scientifique d'évaluation des émissions de polluants locaux et de gaz à effet de serre (GES). Cette étude s'est focalisée sur les émissions d'un panel de 22 véhicules représentatifs des modèles les plus vendus en France. Le rapport final, disponible sur le site www.ifpenergienouvelles.fr a été publié en décembre 2020. Il a été présenté le 16 décembre 2020 au Comité Stratégique de Filière automobile et mobilité, présidée par Luc Chatel, en présence d'Agnès Pannier-Runacher, Ministre déléguée auprès du ministre de l'Économie, des Finances et de la Relance, chargée de l'Industrie.

ÉMISSIONS : LE POINT SUR LES NORMES, LES TECHNOLOGIES ET L'USAGE URBAIN

Les résultats de l'étude montrent :

Le respect des normes d'émissions

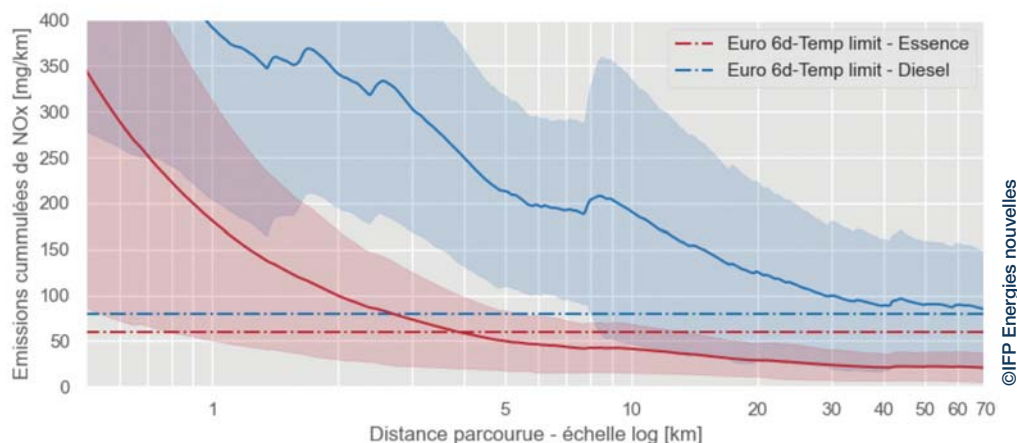
Sauf exception, cette campagne expérimentale montre que les véhicules Euro 6d-TEMP essence comme diesel respectent en moyenne les seuils normatifs en usage réel de type RDE (*Real Driving Emissions*, test des émissions en roulage réel), y compris dans des conditions de conduite très dynamiques ou dans des conditions climatiques froides et chaudes sur des véhicules non neufs prélevés sur le parc. Des exceptions concernent les émissions de NO_x des véhicules diesel n'utilisant pas la technologie SCR (*Selective Catalytic Reduction*) avec injection d'urée dans leur système de dépollution, les émissions de particules fines de certains véhicules essence sans filtre à particules et les émissions de monoxyde de carbone (CO) de certains véhicules essence en usage très dynamique.

Des différences notables entre les technologies

Des différences notables entre les technologies subsistent toutefois : les émissions de NO_x restent supérieures en diesel et les émissions de particules fines se montrent supérieures en essence y compris en prenant en compte l'impact des régénérations des véhicules diesel.

Des émissions en hausse en usage urbain

Les niveaux d'émissions sont en hausse importante en usage urbain, en particulier les émissions de NO_x : +79 % en essence et +74 % en diesel en considérant les phases RDE urbaines normatives par rapport au roulage de type RDE complet. Ces niveaux d'émissions sont encore plus élevés si l'on se focalise sur des conditions beaucoup plus représentatives de l'usage urbain. Le niveau moyen diesel en usage urbain atteint alors 172 mg/km contre 40 mg/km pour les véhicules essence. La figure ci-dessous représente l'évolution des émissions de NO_x en fonction de la distance du trajet et illustre les niveaux importants des véhicules diesel sur les trajets les plus courts.



Comparaison de l'évolution des émissions cumulées de NO_x en fonction de la distance sur essai RDE entre véhicule essence et diesel (lignes épaisses). Les aires colorées représentent l'écart type.

Émission de CO₂ des véhicules hybrides rechargeables : une question de recharge

Le véhicule hybride rechargeable présente, sur cette campagne, des niveaux d'émissions de CO₂ extrêmement sensibles à l'état de charge de la batterie : il est aussi bien capable d'approcher le zéro émission (recharge systématique entre des trajets plus courts que l'autonomie électrique et une conduite peu dynamique) ou ne faire qu'égaliser son homologue non rechargeable (sans pour autant le dépasser). L'efficacité environnementale réelle de cette technologie de véhicule est donc conditionnée à son usage et notamment à de bonnes pratiques en termes de fréquence de recharge par les utilisateurs. Les études de comportement réalisées à ce stade initial montrent que ces pratiques sont aujourd'hui bien moins vertueuses que la norme n'en fait l'hypothèse, entraînant des émissions de CO₂ en usages réels plus importantes que celles homologuées.

ESSENCE ET DIESEL : COMPARATIF

Les résultats de l'étude montrent qu'à l'exception de deux cas, les émissions de polluants en usage réel de type RDE respectent en moyenne les seuils normatifs, aussi bien en essence qu'en diesel, y compris dans des conditions de conduite très dynamiques ou dans des conditions climatiques froides et chaudes.

En ce qui concerne la comparaison des technologies essence et diesel, l'étude relève :

Sur les émissions d'oxyde d'azote (NO_x)

En excluant les deux véhicules diesel à technologie de dépollution LNT (*lean-nox trap*) et en ne conservant donc que les véhicules disposant d'un système de dépollution à l'urée (dit SCR), les émissions moyennes d'oxydes d'azote (NO_x), dans le cadre de l'étude, sont de 57 mg/km pour les véhicules diesel contre 20 mg/km pour les véhicules essence. La moyenne passe à 89 mg/km pour les véhicules diesel en incluant les deux véhicules diesel à technologie de dépollution LNT. Par ailleurs, les niveaux d'émissions sont plus importants sur des trajets courts (typiquement en usage urbain), du fait du fonctionnement « à froid », dans les premiers kilomètres, du moteur et des systèmes de traitement des émissions.

Sur les émissions de gaz à effet de serre

La consommation de carburant est supérieure en essence, entraînant des émissions de CO₂ supérieures de 11 % par rapport au diesel. Lorsque les gaz à effet de serre non réglementés (protoxyde d'azote N₂O et méthane CH₄) sont pris en compte, un véhicule essence émet 6 % de gaz à effet de serre de plus qu'un véhicule diesel similaire.

Sur les émissions de particules

En prenant en compte l'impact des régénérations du filtre à particules, le niveau moyen d'émission de particules de taille supérieure à 23 nm des véhicules diesel est 2,8 fois plus faible que celui des versions essence sur le périmètre de l'étude (le niveau étant très variable en essence).

Sur les émissions de monoxyde de carbone

Elles sont de 434 mg/km pour l'essence contre 83 mg/km pour le diesel.



Pour aller plus loin sur le site www.ifpenouvelles.fr :

- Consultez un rappel des objectifs et accédez au protocole complet.
- Découvrez un zoom sur les émissions moyennes des véhicules à motorisation thermique conventionnelle sur le protocole complet.
- Téléchargez le rapport d'étude exhaustif.

RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE

L'abondement Carnot offre au Carnot IFPEN Transports Energie l'opportunité d'accélérer le développement ou l'adaptation de ses compétences pour faire face à l'évolution des besoins du marché.



Vers les batteries de nouvelle génération

Problématique et axes de recherche

L'électrification du parc automobile mondial poursuit sa progression et entraîne une augmentation de la demande en batteries. Maîtriser cette filière devient essentiel pour l'avenir de l'industrie automobile européenne.

C'est pourquoi de nombreuses initiatives ont été prises par les institutions nationales ou européennes pour faire émerger une filière de batterie en Europe. Dans ce cadre, les travaux réalisés au sein du Carnot IFPEN TE ont pour objectif de mettre en place les outils et méthodes destinés à soutenir l'émergence de cette nouvelle filière.

En 2020, les axes de recherche ont porté sur :

- la prise en compte de la dimension mécanique dans les modèles multiphysiques ;
- la mise en place de nouvelles techniques de caractérisation ;
- le prototypage rapide par impression 3D.

LES RÉSULTATS OBTENUS

Des modèles électriques, thermiques et mécaniques

Lorsqu'elles sont en fonctionnement, les futures générations de batteries Gen3b (Li-ion) ou Gen4b (Li-métal tout solide) sont soumises à des variations volumiques importantes de leurs électrodes. Ces variations entraînent une évolution des contraintes mécaniques internes et donc de leurs performances.

En outre, la dimension mécanique était jusqu'ici négligée dans les modèles multiphysiques des outils de simulation destinés au design de la batterie ou à la compréhension de son fonctionnement. Le Carnot IFPEN TE a donc entrepris le développement de modèles de microstructures d'électrodes Gen3b à composite silicium-graphite. Ces développements seront ensuite étendus aux Gen4b.

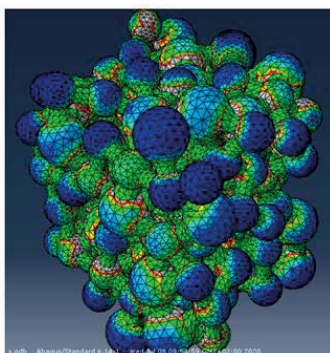
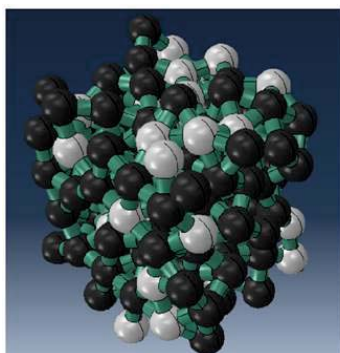
De nouvelles méthodes de caractérisation

Les futures générations de batteries utiliseront toujours majoritairement le lithium. Cet élément très léger a cependant la particularité d'être difficilement détectable et quantifiable par les méthodes de caractérisation classiques en laboratoire, ce qui rend difficile l'étude de ces systèmes.

Le Carnot IFPEN TE a évalué avec l'institut Lumière Matière de Lyon la possibilité d'utiliser une nouvelle méthode de microscopie quantitative du lithium basée sur la LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*). Les résultats encourageants ont poussé les deux partenaires à proposer le projet ANR Micro Q Li pour le développement de ce nouvel outil. Le projet a démarré en 2021.

L'impression 3D comme outil de prototypage

La composition 100 % solide des futures batteries Gen4 rend possible leur mise en œuvre avec de nouvelles techniques comme l'impression 3D. Le Carnot IFPEN TE a donc décidé d'évaluer l'impression d'électrolytes solides à partir de différentes méthodes d'impression et pour différentes formulations. Les travaux se poursuivront avec les autres constituants.



Microstructure 3D d'une électrode composite qui se déforme au cours des cycles de charge et décharge.



Des moteurs électriques sans terres rares et des composants innovants

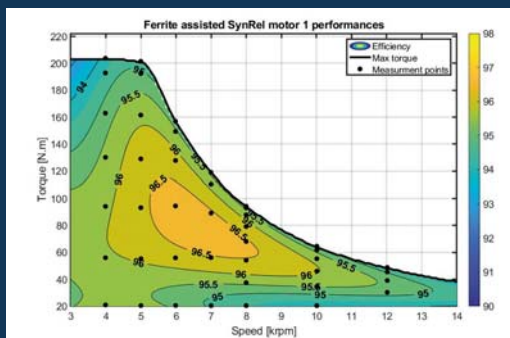
Problématique et axes de recherche

La mobilité électrique se diversifie en termes d'architectures de chaînes de traction, de sources d'énergies, de gamme de tension et de puissances. En outre, deux perspectives d'importance entrent en ligne de compte : d'une part, la montée en tension pour accélérer la recharge et maximiser la densité de performances et, d'autre part, la prise de conscience sur l'usage des terres rares et leur empreinte écologique.

L'action menée au sein du Carnot IFPEN TE en 2020* a porté sur :

- l'évaluation des moteurs à base d'aimants sans terres rares,
- la caractérisation de l'électronique de puissance Wide Band Gap de type MOSFET SiC haute tension.

*Voir aussi le rapport Carnot IFPEN Transports Energie 2019 p.14



Performances d'un moteur synchro-reluctant assisté d'aimants Ferrites sans terres rares.

Evaluation de la vitesse de commutation (dv/dt) sous 750V et maîtrise de la surtension à l'ouverture.

LES RÉSULTATS OBTENUS

Amélioration des performances des moteurs sans terres rares

Pour explorer les problématiques de faible densité de performance et de démagnétisation facile des aimants ferrites (sans terres rares et disponibles largement), trois parties actives ont été conçues et évaluées expérimentalement.

Cette action a permis d'améliorer les performances de ce type de moteur sans terres rares en se rapprochant des machines de référence avec aimant Néodyme.

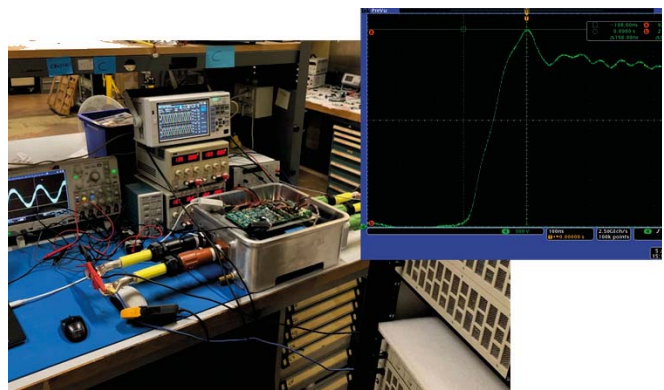
Par ailleurs, les limitations en démagnétisation ont été identifiées au travers d'expérimentations ayant permis de les reproduire. La maîtrise de cette problématique demandera d'être approfondie via des études complémentaires.

Compréhension des composants d'avenir

L'augmentation de la tension de la source électrique apporte une réduction potentielle du temps de recharge et l'accroissement des performances du moteur côté puissance et côté rendement.

L'électronique à base de composants Wide Band Gap de type MOSFET SiC (Carbure de Silicium), qui vise à doubler la densité de puissance par rapport à la technologie IGBT, a été évaluée expérimentalement sous 750V et 750AAC.

Les leviers tels que la fréquence de découpage accrue et variable et les commutations rapides jusqu'à 10kV/μs en limitant les surtensions sans ajout de composants d'aide à la commutation ont été étudiés et quantifiés expérimentalement par le Carnot IFPEN TE. Cela a permis de mieux appréhender le comportement et le fonctionnement de ces composants du futur.





Des algorithmes d'intelligence artificielle plus performants

Problématique et axes de recherche

Les applications de mobilité font remonter les traces GPS associées aux déplacements d'une communauté d'utilisateurs. Or, ce sous-ensemble de données représente la mobilité d'une communauté particulière, peu représentative de l'ensemble de la population. Il s'agit donc de confronter des données particulières agrégées à des données plus globales* afin de disposer de ressources plus riches sur l'intégralité des usages de la population.

Au cours de cette seconde année**, les travaux du Carnot IFPEN TE se sont tout d'abord concentrés sur l'extension des traitements réalisés sur l'ensemble de l'historique des données de mobilités de la base Geco air. Une amélioration du « nettoyage » des traces utilisateurs par itération entre l'exploitation des indicateurs agrégés et les algorithmes de traitement des données a également été réalisée.

Dans un second temps, des indicateurs spécifiques ont été calculés à partir des usages. Ces éléments ont permis d'évaluer différentes méthodes de classification afin de disposer d'une base de données la plus représentative possible en termes de pratiques individuelles et de parc automobile.

* La complétion de données manquantes est opérée par regroupement des environnements « similaires ».

** Voir aussi le rapport Carnot IFPEN Transports Energie 2019 p.17

LES RÉSULTATS OBTENUS

Mise au point d'une base de données représentatives

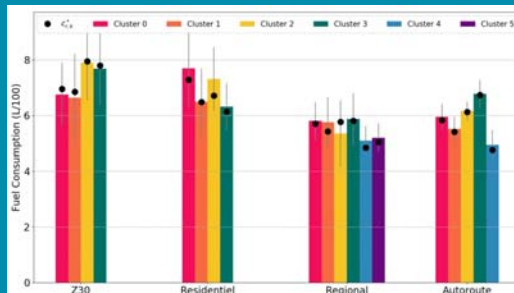
La confrontation de ces éléments avec d'autres types de données (enquêtes générales transport, site de déclaration de consommation des utilisateurs, etc.) a entériné la pertinence des données associées aux utilisateurs de véhicules légers à des fins de suivi de consommation et d'émissions polluantes.

D'autre part, la classification des usages a été étendue à l'ensemble des trajets enregistrés en véhicules légers, entraînant alors le traitement d'une importante quantité de données. Ce dernier point a conduit à la mise en place d'un outil générant un cycle d'usage représentatif de l'environnement et de la conduite, exploité par des services de prédiction de la consommation réelle associée à un usage spécifique.

L'outil bénéficie de l'exploitation de la richesse des données de mobilité acquise via l'application Geco™ air, avec une approche permettant de décomposer les usages en éléments simples issus de la communauté.

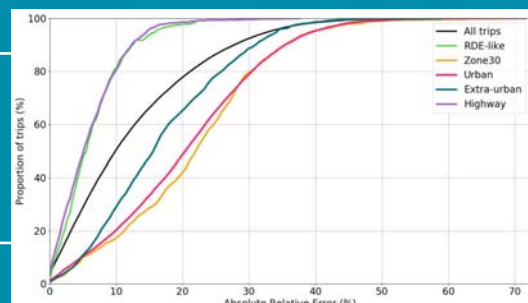
Représentativité et exploitation des données de mobilité

- Amélioration de l'algorithme de nettoyage des données de mobilités
- Capitalisation des algorithmes de traitement des données dans un package python
- Traitement de l'ensemble des données de la base Geco™ air
- Passage à l'échelle de l'ensemble des données de l'algorithme de classification des usages
- Analyse des consommations obtenues à l'aide de classification



Détail des consommations obtenues à l'aide des clusters d'usage

Distribution des erreurs obtenues entre l'usage moyen et le trajet réalisé





Atteindre de très hauts rendements grâce à des systèmes de combustion en rupture

Problématique et axes de recherche

Les récentes études prospectives confirment que le moteur à combustion interne restera un élément central du développement actuel et futur des chaînes de traction, y compris dans le contexte d'électrification croissante des véhicules. L'approche R&I du Carnot IFPEN TE vise à augmenter significativement le rendement thermodynamique des motorisations thermiques par l'optimisation des technologies existantes ou par l'introduction de solutions en rupture, tout en veillant à tendre vers la nullité de l'impact sur la qualité de l'air. Ainsi, les travaux du Carnot ont contribué à la définition de motorisations essence utilisant un cycle dit de Miller, assurant des gains en rendement très significatifs (rendement pic de 45 %), tout en conservant un fonctionnement à la stœchiométrie qui permet l'utilisation d'un système de post-traitement simple et efficace. Les travaux en cours et à venir devraient permettre d'atteindre des rendements de 47 %.

En 2020, la poursuite des travaux de recherche vers les très hauts rendements a porté sur :

- les systèmes de combustion à préchambre active : les travaux se poursuivront sur la maximisation de la dilution par l'EGR de manière à conserver des solutions simplifiant le post-traitement et minimisant le coût de la boucle d'air ;
- l'optimisation des systèmes de combustion de type SACI (*Sark Assisted Compression Ignition*) afin de définir les besoins technologiques pour développer un système de combustion dédié ;
- une large étude de la minimisation des pertes thermiques et des sources d'hydrocarbures imbrûlés sur les systèmes de combustion essence.

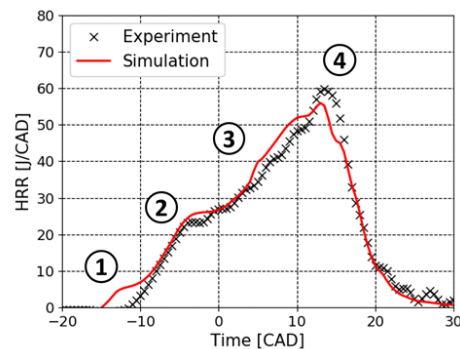
LES RÉSULTATS OBTENUS

Des modes de combustion à haut potentiel de rendement

Les 3 axes ont été travaillés en synergie, en se basant sur l'expérience des années précédentes* concernant les systèmes de combustion à préchambre active en mélange pauvre. Les résultats expérimentaux 2019 avaient mis en avant des systèmes de combustion à préchambre faisant apparaître des modes de combustion par auto-inflammation, à fort potentiel de rendement (49 %). L'activation de l'auto-inflammation permet de coupler un démarrage de combustion rapide par éjection des jets de flamme de la préchambre, suivi d'une fin de combustion par auto-inflammation, rapide également et sans cliquetis, le tout dans un milieu très dilué (taux de dilution $\geq 50\%$), donc avec des pertes aux parois réduites.

Modélisation d'un dégagement d'énergie en 3D pour un design de préchambre

Un travail approfondi de méthodologie et de compréhension de ces systèmes a été mené numériquement, afin de pouvoir proposer des axes d'amélioration. Les outils de modélisation 3D ont permis de reproduire un dégagement d'énergie en quatre phases, comme celui observé expérimentalement (*voir schéma*).



- ① Combustion rapide dans la PC.
- ② Éjection des jets de flamme.
- ③ Propagation des noyaux de flamme lente.
- ④ Fin de combustion rapide en AI.

L'analyse des résultats de calcul 3D sur différentes configurations de systèmes de combustion a montré que l'adéquation entre les paramètres de la préchambre et l'aérodynamique interne optimise le compromis vitesse de combustion / transferts thermiques.

Ces travaux de compréhension ont été transposés vers un système de combustion fortement dilué mais à l'EGR cette fois, pour faciliter le post traitement en conservant un mélange stœchiométrique. Un design de préchambre a été proposé, intégrant un injecteur mélange air/essence et une bougie. Cette préchambre sera évaluée au banc moteur en 2021 sur un système de combustion essence haut rendement.

*Voir aussi le rapport Carnot IFPEN Transports Energie 2019 p.18



Des moteurs thermiques en mutation

Problématique et axes de recherche

Pour réduire la consommation et les émissions de polluants, préparer l'évolution des modes de mobilité et s'inscrire dans la transition énergétique, les industriels doivent relever de nombreux défis technologiques. En parallèle, les experts s'accordent à dire que le moteur à combustion interne demeurera la technologie de propulsion dominante pour les applications domestiques et industrielles dans le futur marché mondial. Dans ce contexte, les équipes du Carnot IFPEN TE travaillent à augmenter significativement le rendement thermodynamique des motorisations thermiques par l'optimisation des technologies existantes ou émergentes, mais aussi par l'introduction de solutions en rupture, tout en veillant à conserver un système de dépollution simple et efficace sur toute sa plage de fonctionnement. En 2020, trois grands axes de recherches ont été mis en œuvre :

- l'identification de technologies alternatives pour améliorer significativement le rendement des moteurs à pistons, en levant des verrous identifiés pour appliquer des combustions en mélange dilué par l'air ou l'EGR et dissociant taux de compression et taux de détente ;
- l'identification de carburants adaptés à ces types de combustion, pouvant contribuer, grâce à leur composition et les propriétés associées, à l'amélioration du rendement ;
- l'étude de systèmes de post-traitement efficaces dans des conditions de faibles températures et/ou d'excès d'oxygène, issues de combustions fortement diluées par l'air.

LES RÉSULTATS OBTENUS

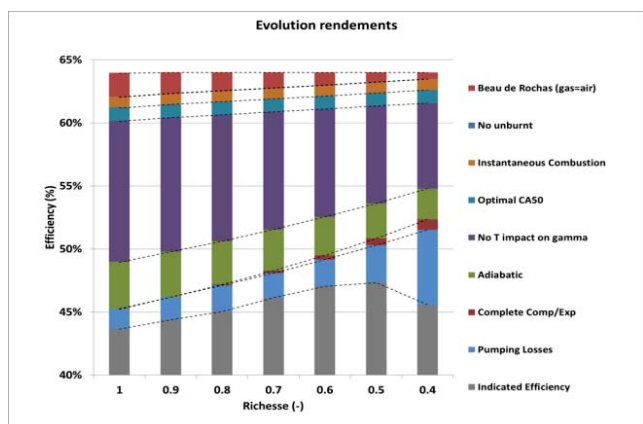
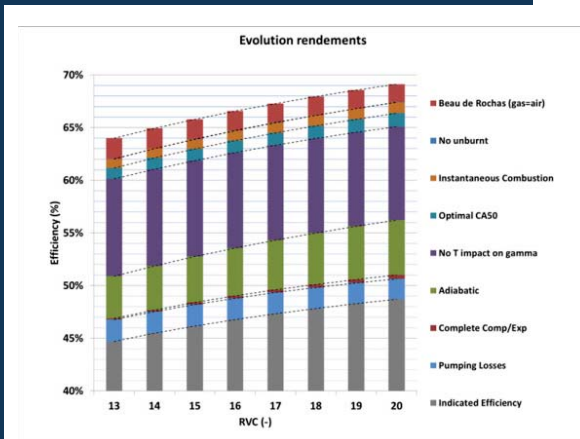
Identification des postes de perte de rendement

Un des objectifs de cette action est d'identifier des technologies de moteurs thermiques en rupture, permettant d'atteindre, dans certaines conditions de fonctionnement, des rendements très élevés (50 % visé).

Les travaux ont montré que le plafonnement des rendements s'explique d'abord par des températures de combustion élevées (propriétés des gaz sensibles à la température), puis par les pertes thermiques aux parois élevées en phase de combustion, les niveaux de dilution trop faibles (impact gamma des gaz) et enfin par les émissions d'imbrûlés. Le potentiel de ces nombreux bras de levier a été étudié en modélisation OD.

Atteindre les très hauts rendements se fera en partie via le système de combustion, en couplant un niveau de dilution élevé de 50 % à un fort taux de compression (RVC). L'asymptote du taux de dilution se positionne autour de 50 %, l'énergie à fournir par la boucle d'air pour dépasser ce seuil au-delà étant le verrou majeur.

De même, l'augmentation du rendement thermodynamique par le RVC est limitée par l'augmentation des transferts thermiques. Il a été démontré que pour atteindre 50 % de rendement, il sera nécessaire de gagner sur l'ensemble des postes : boucle d'air, frottements, transferts thermiques, etc.

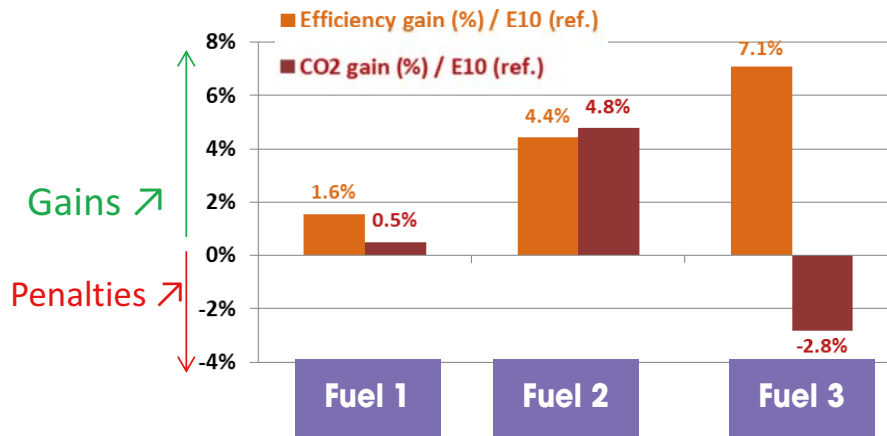


Identification de l'impact positif des biocarburants avancés

Les biocarburants avancés peuvent contribuer à améliorer de manière significative les performances des véhicules thermiques, tant en matière de rendement moteur que d'émissions de CO₂.

Dans ce contexte, le Carnot IPFEN TE a identifié les propriétés clés des carburants contribuant à améliorer ces deux paramètres. Des essais moteur ont été effectués pour mettre en avant l'impact de différentes formulations.

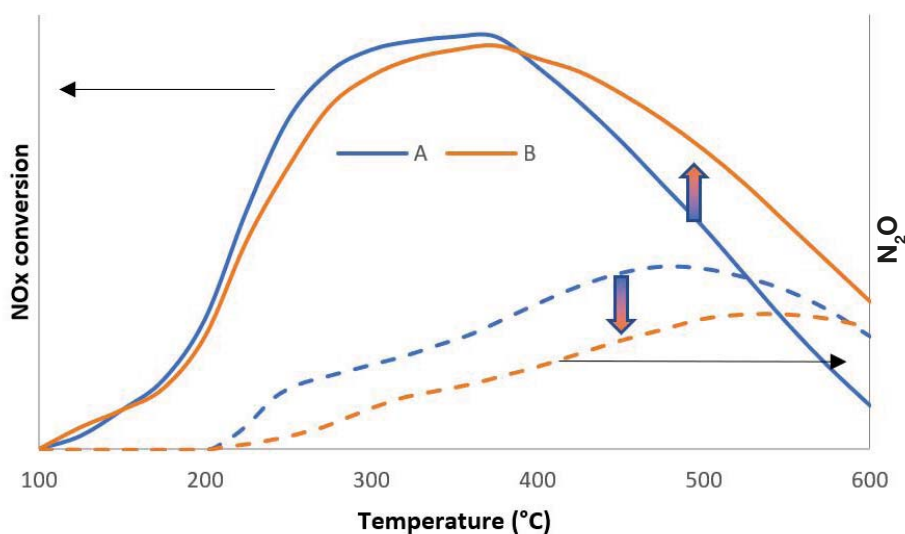
La figure ci-dessous illustre le rendement moteur et les émissions de CO₂ obtenus avec trois formulations de carburant. Les résultats montrent que le carburant peut effectivement contribuer à améliorer à la fois le rendement et les émissions de CO₂. L'étude démontre ainsi l'impact positif que pourraient avoir les biocarburants avancés pour contribuer à réduire l'empreinte environnementale des véhicules thermiques.



Des catalyseurs pour limiter les émissions de NO_x

Les données disponibles relatives aux conditions échappement - température, débit, composition chimique - de moteurs à allumage commandé à combustion très fortement diluée principalement à l'air ($\lambda \approx 2$) ont été analysées et révèlent une forte similarité avec celles de moteurs Diesel.

Cependant, il est difficile d'atteindre ces niveaux de dilution sur une large plage de fonctionnement et on constate une élévation rapide de la température avec la diminution du λ , ce qui pourrait notamment imposer le recours à des catalyseurs SCR actifs à plus haute température. Les travaux du Carnot IPFEN TE ont porté sur les catalyseurs à base de zéolithes échangées, qui peuvent de plus limiter la formation de protoxyde d'azote dont les niveaux d'émission pourraient être réglementés pour Euro 7.



Influence de la formulation catalytique sur la conversion des NO_x et la formation de N₂O

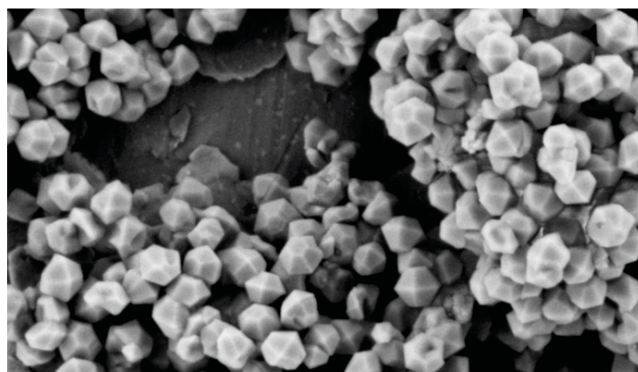


Vers un objectif zéro émission : la dépollution des moteurs à haut rendement

Problématique et axes de recherche

Réduire l'impact des émissions des véhicules à moteur thermique est un impératif à la fois réglementaire et sociétal. Il convient notamment de réduire le plus possible les émissions polluantes produites dès la mise en action du moteur, alors que les systèmes classiques de dépollution n'ont pas encore atteint leur efficacité maximale, notamment concernant les oxydes d'azote et les hydrocarbures imbrûlés. Ainsi, le Carnot IFPEN TE étudie la conception de systèmes de dépollution avancés visant d'une part à stocker temporairement NO_x ou hydrocarbures imbrûlés, le temps que les organes de dépollution atteignent une température suffisante pour être pleinement efficaces, et d'autre part à améliorer la réduction catalytique sélective (SCR) des oxydes d'azote (NO_x) par l'ammoniac, tout en produisant aussi peu de protoxyde d'azote N_2O que possible. Concernant le stockage des NO_x , une voie pertinente réside dans l'emploi de matériaux microporeux tels que les zéolithes, rendues fonctionnelles par insertion d'un métal noble. Le bon choix de paramètres structuraux pour ce type de matériau, cette fois rendu fonctionnel avec du cuivre, peut aussi permettre d'accroître la sélectivité de la réduction des NO_x et ainsi limiter la formation de N_2O .

Les matériaux microporeux tels que les zéolithes représentent une voie pertinente pour stocker temporairement les oxydes d'azote ou les hydrocarbures imbrûlés.



LES RÉSULTATS OBTENUS

Abaissement de la température nécessaire à la réduction des NO_x

Après avoir mené une analyse bibliographique approfondie, les travaux de recherche pour la SCR des NO_x par l'ammoniac se sont portés vers des matériaux zéolithiques à petits pores. Leur résistance au vieillissement hydrothermique s'est avérée très élevée pour une certaine plage de rapport atomique entre le silicium et l'aluminium le constituant. De nombreuses synthèses en laboratoire ont été effectuées, faisant varier les conditions opératoires – sources de silicium et d'aluminium, agent organique structurant, complexant, proportions, durée de synthèse, agitation ou non, etc. – qui ont été analysées d'abord du point de vue de leurs caractéristiques de cristallinité ; puis, pour les plus intéressantes, via un test catalytique à lit fixe traversé par des gaz sélectionnés.

Ce type de structure, une fois rendu fonctionnel avec du cuivre, s'est révélé non seulement pertinent pour abaisser la température minimale à laquelle la réduction des NO_x devient efficace, mais encore pour limiter la formation de N_2O , notamment après que le matériau a subi un vieillissement accéléré très sévère, représentatif des conditions thermiques élevées rencontrées lors de la combustion des suies piégées dans un filtre.

Une marge de progression reste toutefois à explorer pour abaisser encore la température d'amorçage des réactions afin de surclasser les matériaux récemment mis sur le marché.

Stockage des NO_x par adsorption : des performances prometteuses

La même famille de structure zéolithique (parmi les plus de 200 existants) a fait l'objet de travaux visant à stocker temporairement les NO_x par adsorption sur des nanoparticules de métal noble. Ces recherches ont permis d'atteindre des performances du même ordre de grandeur que celles revendiquées dans la littérature scientifique. Il n'est pas possible de se comparer à des matériaux commerciaux, non disponibles pour l'instant sur des véhicules de série.

Enfin, le stockage d'hydrocarbures a encore été peu exploré, en raison principalement de la grande variété de molécules à prendre en compte, rendant difficile la conception de conditions de test représentatives d'un usage réel, ainsi que l'indique nettement l'analyse bibliographique.

PROFESSIONNALISATION ET DÉVELOPPEMENT DE PARTENARIATS SOCIO-ÉCONOMIQUES

En 2020, le Carnot IFPEN Transports Energie a renforcé ses démarches en matière de marketing stratégique et de promotion de l'innovation. Il est notamment engagé auprès des petits acteurs industriels (TPE, PME et ETI) pour les accompagner dans leurs développements R&D ou pour développer en partenariat des produits et des services répondant aux besoins de la mobilité durable.



Mise au point d'essais de moteurs électriques pour applications automobiles

Pour identifier les performances de moteurs électriques et d'onduleurs associés, une campagne d'essais a été réalisée. Un cahier des charges définissant l'ensemble des tests à effectuer ainsi que le séquençement à suivre a été élaboré par le Carnot IFPEN TE, qui s'est appuyé sur ses partenaires socio-économiques. Plusieurs prototypes et configurations de moteurs ont fait l'objet de cette campagne d'essais avec deux enjeux importants : la répétabilité des essais et l'amélioration de la productivité et de l'efficacité du moyen de tests. L'application industrielle ciblée pour cette action concernait un moteur électrique et son onduleur associé pour une chaîne de traction haute tension et forte puissance d'un véhicule électrique (VE).

Moyens mis en place : installation, procédure et validation des essais

En 2020, les équipes du Carnot IFPEN TE ont travaillé sur :

- L'optimisation des pratiques de montage et démontage des pièces d'adaptation nécessaires pour installer le système au banc d'essais.
- L'établissement de procédures automatiques d'essais pour une meilleure productivité, maîtrise et répétabilité des essais, tout en prenant en compte les exigences normatives de l'automobile définies par leurs partenaires industriels.
- L'amélioration du workflow de post-traitement et de validation des résultats d'essais et la mise en place d'un fonctionnement hors présence opérateur.

RÉSULTATS

Établissement d'une base de données de référence

L'année 2020 aura permis de réaliser :

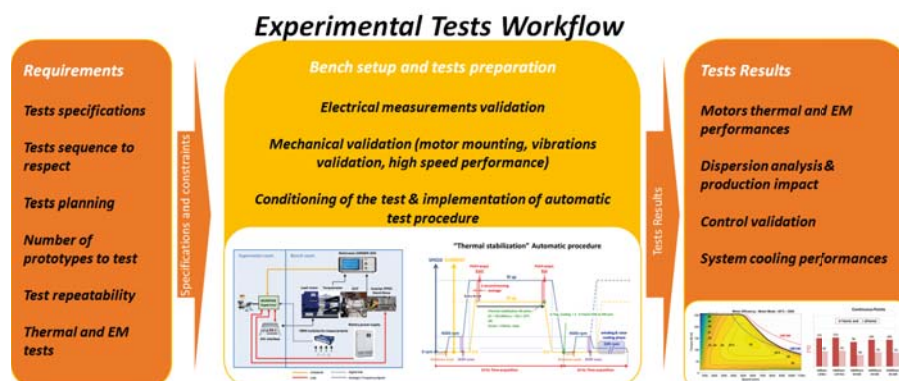
- la caractérisation expérimentale détaillée de plusieurs configurations de moteur (prototype et présérie) ;
- l'exploration de la tenue des solutions industrielles proposées, grâce à des tests avancés comme l'endurance et la thermique ;
- des tests d'endurance sur une tôle représentative d'une application industrielle ;
- la capitalisation de l'ensemble des travaux réalisés, notamment les méthodes d'essais montrant la prise en compte des exigences normatives de l'automobile et les rapports d'essais présentés sous une forme compatible avec les exigences des acteurs industriels concernés.

Les différents essais réalisés permettent également :

- d'évaluer l'impact de diverses évolutions de la conception moteurs ainsi que du processus de production (entrefer, bobinage manuel / automatisé, type d'aimants, type de tôles, différents processus industriels de coupage de tôles) sur les niveaux de performance ;
- de valider la technologie de moteur proposée par le Carnot IFPEN TE.

Enfin, la constitution d'une base de données expérimentales, attendue par de nombreux partenaires industriels, consolide les modèles de simulation du Carnot et les études paramétriques réalisées lors de la conception. Elle identifie en outre les déviations potentielles des performances du système dues à des dispersions liées au processus de production. L'ensemble de ces résultats constitue une référence solide vis-à-vis des partenaires socio-économiques.

À noter : voir également Le Rapport Carnot IFPEN Transports Energie 2019 p.19





Classification des données de mobilité grâce au deep learning

Le cœur des applications de mobilité repose sur les capacités d'apprentissage du système. Certaines représentations des données et une bonne capacité d'analyse automatique de leurs différenciations rendent la tâche d'apprentissage plus efficace. L'objectif du Carnot IPFEN Transports Energie est d'associer l'apport des connaissances métiers spécifiques à une problématique aux méthodes classiques de deep learning, afin d'établir une méthodologie de classification des données de mobilité adaptée à la mise en place d'outils de suivi de la mobilité et d'aide à la décision pour les territoires.

Moyens mis en place : mesure et évaluation

En 2019, une première étape* a consisté à définir une liste de descripteurs de comportement et d'usage à partir des données de mobilités et à évaluer des méthodes de deep learning de manière à classer ces données d'un point de vue trajet / utilisateur. En 2020, les travaux de recherche se sont orientés vers l'extension de ces travaux à des données de mobilités douces (trajets à vélo enregistrés par l'application Geovelo) et sur l'agrégation des données de mobilité en général à l'échelle communautaire ainsi que d'un tronçon de route. Afin de proposer aux aménageurs des outils de suivi et d'aide à la décision, les équipes du Carnot ont mis en place des métriques et ont évalué des méthodes de suivi de la tendance des descripteurs à l'échelle communautaire ou celle du tronçon de route. Ceci a été appliqué à la thématique de la sécurité pour les véhicules légers à l'aide des données Geco™ air ainsi qu'à un ensemble de descripteurs de suivi de la mobilité vélo (fréquentation, comportement des cyclistes, sécurité, points durs, ...) à l'aide des données Geovelo.

*Voir le rapport d'activité Carnot IPFEN Transports Energie 2019 p.23

RÉSULTATS

Anticipation des risques

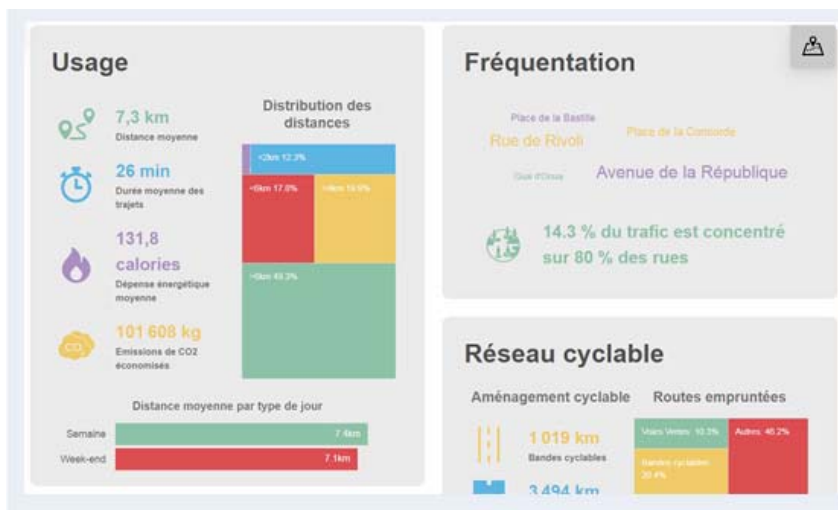
Les données de mobilité brutes recueillies par l'application Geco™ air (trace utilisateur GPS) ont été enrichies à l'aide d'un modèle dynamique du véhicule permettant d'anticiper, à l'aide de calculs, des événements tels que les pertes d'adhérence ou les comportements accidentogènes. Le modèle a été réalisé à partir d'un ensemble de trajets effectués en véhicule léger et projeté sur l'infrastructure routière afin de passer dans un référentiel routier et non utilisateur.

Compréhension des comportements

Une agrégation à l'échelle du tronçon de route a fourni des cartographies de fréquentation des rues et du taux d'incidence des comportements à risque. Ces éléments ont été confrontés à des données d'accidents avérés puis enrichis par des données de contexte de conduite, afin que l'aménageur public dispose de davantage d'éléments de compréhension.

Application des travaux aux données vélo

Un travail similaire sur les données de mobilité vélo remontées par l'application Geovelo a été réalisé et enrichi à l'aide d'un ensemble de descripteurs agrégés à l'échelle de la communauté. Un modèle des séries temporelles des usages et de la fréquentation par tronçon de route a été recalé par régression linéaire en prenant en compte différents vecteurs de perturbation (météo, heure, jour de la semaine, jour férié, vacances). Ce modèle permet de dégager une tendance corrigée d'évolution des usages afin d'identifier de manière automatique les événements marquants d'une période donnée (jour, semaine ou mois). Associé à un algorithme de machine learning adapté, il pourrait permettre de faciliter l'utilisation du tableau de bord de suivi de l'usage vélo en listant les événements importants au sein de l'infrastructure, comme des modifications sur les vitesses ou temps d'arrêt à cause de travaux, d'un événement particulier, d'un réaménagement, etc.



Suivi de l'usage de la mobilité douce – données agrégées à l'usage du vélo.



Des solutions numériques pour analyser l'adéquation entre l'usage réel des véhicules et les technologies de dépollution

La sensibilité des émissions polluantes aux conditions de conduite, telles que comportement de l'utilisateur et aménagements urbains, est significative. Ainsi, le Carnot IFPEN Transports Energie développe des outils pour connaître de manière précise et représentative l'usage réel des véhicules et son impact sur les émissions, en couplant la mesure à l'échappement et le *crowdsensing*.

Ces nouvelles connaissances sont également exploitées pour identifier les causes de surémission et développer des actions permettant de réduire les émissions polluantes sur un territoire donné.

Moyens mis en place : associer mesure et modélisation

Afin d'analyser l'efficacité des technologies développées et d'en évaluer les impacts sur un nombre conséquent de cas de vie, une méthodologie utilisant en synergie la mesure et la modélisation a été développée. La méthode consiste à coupler la mesure embarquée des émissions en usage réel, via un dispositif conçu spécifiquement pour le besoin, à des outils de modélisation microscopique des émissions et des outils de collecte et d'analyse de données d'usage réel à grande échelle.

RÉSULTATS

Perfectionnement des algorithmes

Sur l'axe expérimental, le Carnot IFPEN TE développe en partenariat avec la PME Capelec un analyseur de gaz d'échappement connecté : Real-e.

Ce dernier permet de mesurer en usage réel les polluants réglementés (CO, CO₂, NO_x, PN) et non réglementés (NH₃) plus simplement et à plus grande échelle qu'avec les dispositifs du marché. En 2020, les travaux se sont focalisés sur l'amélioration des algorithmes de spectroscopie UV permettant une mesure dissociée NO/NO₂, l'automatisation de la chaîne d'outils numériques de collecte Cloud et d'analyse des données de mesures, ainsi que la validation sur un échantillon représentatif de véhicules récents de technologies variées.

Amélioration des modèles d'émission de NO_x

Sur l'axe modélisation des émissions, les efforts se sont focalisés sur l'amélioration des modèles microscopiques d'émissions de NO_x pour reproduire le comportement des véhicules répondant aux dernières normes d'homologation (post RDE). La modélisation de la thermique des systèmes SCR et de son impact sur l'efficacité de dépollution a notamment été améliorée pour reproduire les niveaux de performances observés en usage réel.

La performance des codes a également été analysée pour réduire les temps de calcul et permettre de jouer des scénarios à grande échelle, comme par exemple la simulation de l'ensemble des trajets annuels collectés sur la région Île-de-France avec différents scénarios de parc automobile.

Enrichissement de l'application Geco™ air

Au-delà de l'amélioration de la connaissance, les travaux réalisés en 2020 visent à activer des leviers de réduction des émissions. Ils ont ainsi alimenté la nouvelle version de l'application grand public Geco™ air sortie en début d'année 2021, permettant à chacun d'évaluer et de réduire l'empreinte environnementale liée à sa mobilité.





Amélioration et consolidation de la plateforme xDash

xDash est une plateforme *Software-as-a-Service* qui offre aux ingénieurs métiers la possibilité d'agréger, de façon intuitive et indépendante, services web, algorithmes et données de mobilité. Ils peuvent également construire facilement et de façon autonome des tableaux de bord d'analyse, de paramétrage, de simulation et de supervision. Les équipes du Carnot IFPEN Transports Energie ont développé la plateforme en tant que produit accessible au public à l'adresse <https://xdash.io>.

Moyens mis en place : données en temps réel et approche PaaS

Les réalisations de l'année 2020 ont bénéficié des avancées scientifiques et technologiques du domaine de la visualisation graphique interactive*. Les travaux de recherche antérieurs des équipes du Carnot ont permis d'offrir à xDash une capacité originale de gestion de flux de données en temps réel. Finalement, l'utilisation d'une approche PaaS (*Platform as a Service*) a permis un hébergement sécurisé et simple sur Cloud.

*Voir le rapport annuel Transports Energie 2019, page 24

RÉSULTATS

Le logiciel xDash a été renforcé par l'ajout de nouvelles fonctionnalités ou par la consolidation de ses fonctionnalités de base :

- La puissance expressive de ses fonctionnalités de visualisation a été significativement étendue. Grâce au support des technologies basées sur les grammaires de visualisation ECharts et Vega, des utilisateurs non-experts en langages de visualisation graphique peuvent réaliser de façon simple des visualisations sophistiquées correspondant à leurs besoins métiers.
- Son cœur de calcul a été généralisé pour devenir parallèle et supporter les applications multi-rythme, un principe courant avec les objets connectés comme le système Real-e.
- De nouvelles fonctionnalités de personnalisation ont été ajoutées - fontes, couleurs, alignement, etc. - et des fonctionnalités d'édition (auto-complétion du code, suppression automatique des données non utilisées, etc.) ont été améliorées.

Ces nouvelles fonctionnalités ont largement bénéficié aux différents projets utilisateurs du Carnot IFPEN TE, notamment Geco™ air, Mobicloud et Real-e.

Afin de faire connaître l'outil à plus large échelle, un site web de présentation, <https://xdash.io>, a été mis en ligne. Une version open access est également disponible à l'adresse <https://app.xdash.io>

Enfin, un travail important a été entrepris pour l'amélioration de l'ergonomie logicielle de l'outil. Son implémentation fera partie des chantiers de l'année 2021.



Récupération d'énergie appliquée au transport

Dans le domaine de la récupération de chaleur, le Carnot IFPEN Transports Energie est partenaire de la PME française ENOGIA depuis 2014. ENOGIA commercialise depuis plusieurs années des systèmes ORC (Organic Rankine Cycle) dans le domaine des moteurs stationnaires. Les équipes du Carnot déclinent cette technologie, basée sur la récupération de l'énergie perdue dans l'eau de refroidissement des moteurs thermiques, au domaine des transports routiers, notamment pour une application automobile.

Moyens mis en place : prototypage et simulation

Les travaux* s'appuient sur la complémentarité entre moyens expérimentaux et simulations numériques. Plusieurs prototypes ont été conçus et réalisés, afin d'être testés sur un banc d'essais spécifique, conçu pour répondre aux besoins du projet. Les résultats obtenus alimentent ensuite les outils de simulation qui, une fois validés, sont réutilisés afin de concevoir le meilleur système possible pour un cahier des charges donné, permettant ainsi de récupérer une énergie satisfaisante pour un coût maîtrisé.

**Voir également le Rapport d'activité Carnot Transports Energie 2019 page 20*

RÉSULTATS

Des avancées notables sur la conception d'un prototype de turbopompe

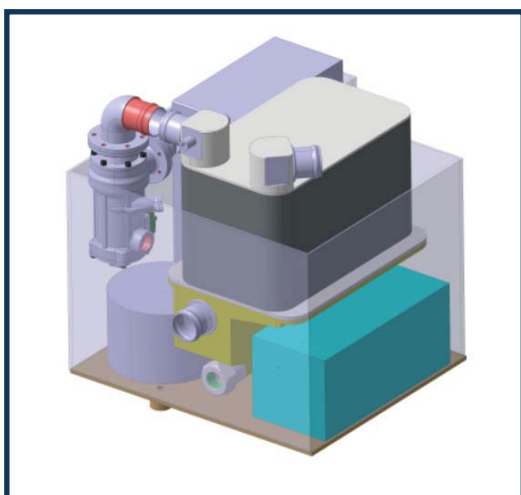
Dans la continuité des travaux 2019, des simulations ont été réalisées en 2020 sur véhicules légers (VL) ou utilitaires (VU) équipés d'un groupe moto-propulseur essence hybridé, en anticipation du cœur de gamme futur. Le Carnot IFPEN TE s'est appuyé sur les résultats expérimentaux acquis les années précédentes à l'aide du démonstrateur de système de récupération d'énergie pour une application automobile (ORC-VL).

Les résultats, couplés aux contraintes d'intégration fortes sur VL remontées par un partenaire industriel automobile, ont incité à se focaliser sur les applications de type VU non hybridés, pour lesquelles une étude de packaging a montré de meilleures possibilités d'intégration sous capot.

Les développements 2020 ont concerné la finalisation de la conception d'un 5e prototype de turbopompe génératrice. Ce dernier, dont l'objectif est d'être intégré sur un démonstrateur VU, s'appuie sur les acquis des conceptions et retours d'expériences des démonstrateurs précédents en apportant les avancées suivantes :

- amélioration du compromis efficacité / coût énergétique de la pompe intégrée malgré la contrainte du coût de fabrication ;
- simplification de l'étage turbine, du nombre de pièces, de l'assemblage et de la connectique électrique pour en réduire les coûts et donc en améliorer le ratio valeur/coût ;
- adaptation du design de l'injecteur et de la roue de turbine pour respecter les performances fixées par le cahier des charges du VU ;
- étude, avec dépôt de brevet à la clé, d'une solution de turbine à admission variable pour améliorer la récupération en transitoire sur le VU ciblé.

Enfin, pour pouvoir développer le contrôle du système ORC pour application automobile, une étude a été menée par simulation afin de dimensionner les organes permettant de transformer le banc d'essais ORC stationnaire en banc dynamique représentatif.



Packaging ORC-VU sous capot



Une vue de la CAO du 5^e démonstrateur

OUVERTURE INTERNATIONALE

Dans le cadre de leurs travaux de recherche, les équipes du Carnot IFPEN Transports Energie sont engagées dans plusieurs projets soutenus par l'Union européenne, notamment dans le cadre du programme Horizon 2020. Elles contribuent ainsi au développement de la R&I européenne pour une mobilité durable.



Le Carnot IFPEN Transports Energie est engagé aux côtés de l'industrie et de la recherche académique au sein de l'Alliance européenne sur la recherche en énergie (EERA). Il assure également une présence active au sein d'instances européennes représentatives de la recherche et de l'industrie (EARPA, ERTRAC, EGVA). En 2020, il a rejoint Polis, réseau de villes européennes, qui soutient le déploiement de technologies et politiques innovantes et durables dans le domaine du transport local. Au sein de ces associations, le Carnot IFPEN TE a activement contribué à la préparation du nouveau programme-cadre européen Horizon Europe.



Électrification des véhicules

MODALIS² Modalis² : modéliser les futures générations de batteries

Porté par le Carnot IFPEN TE et neuf partenaires, Modalis² a pour objectif de développer une chaîne d'outils numériques permettant de modéliser et de concevoir des systèmes de batteries mettant en oeuvre de nouveaux matériaux tels que les alliages avec du silicium pour les électrodes négatives et des électrolytes solides. Modalis² accompagnera le développement des nouvelles générations de cellules de batterie en se basant sur la modélisation et la simulation.

En savoir plus : <https://modalis2-project.eu/en>

ReFreeDrive : des moteurs électriques sans terres rares et des onduleurs intégrés



L'utilisation de terres rares pour les aimants constitue un frein majeur au développement des motorisations électriques. Le projet ReFreeDrive vise ainsi la mise au point d'un concept de machine électrique capable de fonctionner sans terres rares ainsi que d'une nouvelle génération d'onduleurs intégrés aux moteurs. Au sein de ce projet, les équipes du Carnot IFPEN TE sont en charge du design de la machine électrique, de l'onduleur et de la stratégie de contrôle.

En savoir plus : www.refreedrive.eu

Demobase : améliorer l'efficacité et la sécurité des batteries



Le projet Demobase (*Design and MOdelling for improved BAattery Safety and Efficiency*) rassemble 11 partenaires autour de travaux visant à réduire les efforts de conception des chaînes de traction électriques et à améliorer l'efficacité et la sécurité des batteries. Les équipes du Carnot IFPEN TE sont en charge du développement de modèles d'emballage thermique de différentes cellules de batteries lithium-ion, ainsi que de l'évaluation de l'intérêt de ces modèles pour le prédimensionnement de packs batterie prenant en compte les aspects sécurité.

En savoir plus : www.demobase-project.eu

Augmentation du kilométrage des VE : InnoTherMS, un projet partenarial régional

Le projet InnoTherMS (*Innovative predictive high efficient Thermal Management Systems*) a été lancé fin 2018 entre les régions Auvergne-Rhône-Alpes et Bade-Wurtemberg (Allemagne). Rassemblant dix partenaires de ces deux régions, le projet vise la conception et le contrôle des flux de chaleur des véhicules électriques dans le but d'accroître de 10 % le kilométrage parcouru entre chaque recharge. Le Carnot IFPEN TE est responsable du workpackage dédié à l'optimisation et au contrôle prédictif du thermo-management.



Développement de services et d'applications pour le véhicule connecté



Advice : améliorer l'efficacité énergétique des véhicules hybrides

Dans le cadre du projet Advice (*ADvancing user acceptance of general purpose hybridized Vehicles by Improved Cost and Efficiency*), les équipes du Carnot IFPEN TE ont développé un système d'eco-routing conduisant à minimiser la consommation de carburant pour un niveau imposé de la charge de la batterie à destination, tout en prenant en compte l'état du trafic en temps réel.

En savoir plus : www.project-advice.eu



Cevolver : simplifier l'accès des véhicules électriques aux particuliers

Le projet Cevolver (*Connected Electric Vehicle Optimized for Life, Value, Efficiency and Range*) veut simplifier l'usage des véhicules électriques aux particuliers. Piloté par FEV et mené avec neuf partenaires européens, il a notamment pour objectif d'augmenter l'efficacité énergétique de ces véhicules via la mise au point d'algorithmes et le développement des services web. Les équipes du Carnot IFPEN TE apportent leur expertise en contrôle et en développement d'algorithmes.

En savoir plus : www.cevolver.eu/project/

Amélioration de la chaîne de traction de poids lourds grand routier : lancement du projet européen LongRun



Le projet LongRun (*Development of efficient and environmental friendly LONG distance powertrain for heavy duty trucks and coaches*) a été lancé en janvier 2020 dans le but de développer un ensemble complet de chaînes de traction pour poids lourds et autocars plus respectueux de l'environnement. Le Carnot IFPEN TE apportera notamment ses compétences sur la conception et la caractérisation de systèmes de combustion pour carburants à faible impact CO₂ ainsi que sur le développement de services connectés d'eco-routing et d'eco-driving pour réduire l'énergie consommée.

En savoir plus : <https://h2020-longrun.eu/>



Amélioration des motorisations thermiques



Eagle : finalisation du démonstrateur du moteur essence à très haut rendement

Le projet Eagle (*Efficient Additivated Gasoline Lean Engine*), coordonné par IFPEN et mené avec huit partenaires, visait à développer un moteur à allumage commandé essence pour une application hybride permettant des pics de rendement de 50 % tout en réduisant les émissions. Un démonstrateur moteur multicylindre a été réalisé. Les équipes du Carnot IFPEN TE ont développé des systèmes de combustion innovants.

En savoir plus : www.h2020-eagle.eu



Phoenix : l'accélération de la transition vers une mobilité plus respectueuse de l'environnement est lancée

Le projet européen Phoenix (*PHev towards zero EmissionS & ultimate ICE efficiency*), coordonné par IFPEN et mené en partenariat avec sept acteurs industriels et académiques*, lancé en janvier 2021, a pour objectif de développer un démonstrateur de véhicule électrique hybride rechargeable avec un niveau de consommation de carburant et d'émissions de polluants réduit. Les équipes du Carnot IFPEN TE interviendront principalement sur la conception du système de combustion basé sur le concept *Swumble*TM, la conception du système de post-traitement, la réalisation des moteurs prototypes et la calibration énergétique du moteur multicylindre.

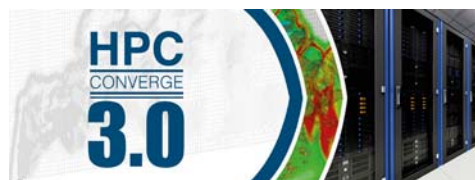
* CRF/ICA (centre de recherche du groupe Fiat), FEV Europe, Johnson Matthey, Marelli Europe, Garrett Motion France, Politecnico di Torino, In Extenso Innovation Croissance

SALONS ET MANIFESTATIONS 2020

En 2020, le contexte sanitaire n'a pas réduit la mobilisation des chercheurs du Carnot IFPEN Transports Energie. La transition numérique engagée depuis plusieurs années a contribué à assurer leur flexibilité et leur adaptabilité. Ainsi, le Carnot IFPEN Transports Energie a pu intervenir lors d'événements aux formats adaptés.

31 mars - 1^{er} avril

Conférence Converge



15 septembre

Think Tank CARA dédié aux moteurs thermiques alimentés à l'hydrogène



5 - 7 octobre

Aachen Colloquium – sustainable mobility



1^{er} et 8 octobre

Journées techniques « La qualité de l'air dans l'automobile » Axelera et CARA



8 - 9 octobre

Batteries event (Lyon)



3 - 4 novembre

SIA Powertrain & Energy

**SIA DIGITAL 2020
POWERTRAIN & ENERGY**

The complete propulsion solution within its energy framework for long range passenger cars and commercial vehicles

17 - 18 novembre

Rendez-vous Carnot

Dans le cadre de l'exposition virtuelle organisée à l'occasion des 15 ans des Carnot, le Carnot IFPEN TE a présenté le système de récupération de chaleur perdue dans les véhicules légers, le système de récupération de chaleur perdue dans les véhicules lourds, et l'analyseur mobile et connecté de gaz d'échappement en conditions réelles Real-e.



SÉLECTION DE PUBLICATIONS

Électrification des véhicules

Machines électriques

- **Design of a permanent magnet assisted synchronous reluctance motor using ferrites**
NASR Andre (IFPEN, Carnot IFPEN TE), CHAREYRON Baptiste (IFPEN, Carnot IFPEN TE), ABDELLI Abdenour (IFPEN, Carnot IFPEN TE), MILOSAVLJEVIC Misa (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
ICEM International conference on electrical machines, Göteborg (Suède), 23-26 août 2020
- **Magnetization strategy for a FeCrCo-based variable flux machine**
DOMINGUES DE SOUSA Flavia (IFPEN, Carnot IFPEN TE), BATTISTON Alexandre (IFPEN, Carnot IFPEN TE), SARABI Siyamak (IFPEN, Carnot IFPEN TE), PIERFEDERICI Serge (Université de Lorraine - France), MEIBODY TABAR Farid (Université de Lorraine - France)
ICEMS International conference on electrical machines and systems, 23rd, Hamamatsu (Japon) 24-27 novembre 2020
- **Separation of the losses at no load conditions in the electric motor with oil cooling shaft**
ABDELLI Abdenour (IFPEN, Carnot IFPEN TE), CHAREYRON Baptiste (IFPEN, Carnot IFPEN TE), NASR Andre (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
ICEMS International conference on electrical machines and systems, 23rd, Hamamatsu (Japon) 24-27 novembre 2020
- **Permanent magnet synchronous motor current harmonic compensation method using model predictive control**
LOPES SIMOES Vinicius (IFPEN, Carnot IFPEN TE), HAJE OBEID Najla (IFPEN, Carnot IFPEN TE), VIDAL-NAQUET Fabien (IFPEN, Carnot IFPEN TE), ZITO Gianluca (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
IEEE ISIE International symposium on industrial electronics, 29th, Delft (Pays-Bas), 17-19 juin 2020

ORC

- **Superheating control of an organic rankine cycle for recovering waste heat from an engine cooling system**
DUBUC Donatien (IFPEN, Carnot IFPEN TE), TONA Paolino (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Control Engineering Practice, Vol. 101, Août 2020, Article No 104519, doi : 10.1016/j.conengprac.2020.104519

Stockage de l'énergie

- **A simplified electrochemical model for modelling Li-ion batteries comprising blend and bidispersed electrodes for high power applications.**
PETIT Martin (IFPEN, Carnot IFPEN TE), CALAS Elisa (IFPEN, Carnot IFPEN TE), BERNARD Julien (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Journal of Power Sources, Vol. 479, 15 décembre 2020, Article No 228766, doi : 10.1016/j.jpowsour.2020.228766

Développement de services et d'applications pour le véhicule connecté

Efficacité énergétique et environnementale des mobilités

- **Energy-efficient driving of road vehicles : toward cooperative, connected, and automated mobility**
SCIARRETTA Antonio (IFPEN, Carnot IFPEN TE), VAHIDI Ardalan (CLEMSON University Etats-Unis)
Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure, ISBN 978-3-030-24126-1, ebook ISBN 978-3-030-24127-8, 2020, 294 p., doi : 10.1007/978-3-030-24127-8
- **A time- and energy-optimal routing strategy for electric vehicles with charging constraints**
DE NUNZIO Giovanni (IFPEN, Carnot IFPEN TE), BEN GHARBA Ibtihel (IFPEN, Carnot IFPEN TE), SCIARRETTA Antonio (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
ITSC International conference on intelligent transportation systems, 23rd, Rhodes (Grèce), 20-23 septembre 2020
- **A stochastic data-based traffic model applied to vehicles energy consumption estimation**
LE RHUN Arthur (IFPEN, Carnot IFPEN TE), BONNANS Frederic (INRIA Saclay France), DE NUNZIO Giovanni (IFPEN, Carnot IFPEN TE), LEROY Thomas (IFPEN, Carnot IFPEN TE), MARTINON Pierre (INRIA Paris France)
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 21, No 7, 2020, pp. 3025-3034, doi : 10.1109/TITS.2019.2923292
- **Variable speed limits control in an urban road network to reduce environmental impact of traffic**
OTHMAN Bassel (IFPEN, Carnot IFPEN TE), DE NUNZIO Giovanni (IFPEN, Carnot IFPEN TE), DI DOMENICO Domenico (IFPEN, Carnot IFPEN TE), CANUDAS DE WIT Carlos (INRIA Grenoble France)
ACC American control conference, Denver (Etats-Unis), 1-3 juillet 2020
- **From trips database to real-world fuel consumption: model and large-scale simulation framework**
MICHEL Pierre (IFPEN, Carnot IFPEN TE), PIRAYRE Aurelie (IFPEN, Carnot IFPEN TE), RODRIGUEZ RODRIGUEZ Sol Selene (IFPEN, Carnot IFPEN TE), CHASSE Alexandre (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
ITSC International conference on intelligent transportation systems, 23rd, Rhodes (Grèce), 20-23 septembre 2020

Usage des véhicules et qualité de l'air

- **Robust and affordable IoT solution for In-service conformity testing.**
SCHIFFMANN Philipp (IFPEN, Carnot IFPEN TE), AGOUZOUL Youssef (IFPEN, Carnot IFPEN TE), KERMANI Joseph (IFPEN, Carnot IFPEN TE), DEGEILH Philippe (IFPEN, Carnot IFPEN TE), FROBERT Arnaud (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
SAE International powertrains fuels & lubricants meeting, Cracovie (Pologne), 22-24 septembre 2020, SAE 2020-01-2187
- **REAL-e a compact measurement system for regulated and unregulated emissions.**
SCHIFFMANN Philipp (IFPEN, Carnot IFPEN TE), FROBERT Arnaud (IFPEN, Carnot IFPEN TE), AGOUZOUL Youssef (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
SIA Powertrain & energy, Rouen (France), 16-29 novembre 2020

Amélioration des motorisations thermiques

Modélisation et simulation de la combustion

- **Real-fluid injection modeling and LES simulation of the ECN spray A injector using a fully compressible two-phase flow approach**

YANG Songzhi (IFPEN, Carnot IFPEN TE), YI Ping (IFPEN, Carnot IFPEN TE), HABCHI Chaouki (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
International Journal of Multiphase Flow, Vol. 122, 2020,
Article No 103145, 21 p., doi : 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103145

- **Experimental investigation and modeling of early flame propagation stages in operating conditions representative of modern High efficiency spark ignition engines**

DULBECCO Alessio (IFPEN, Carnot IFPEN TE), FONT Gregory (IFPEN, Carnot IFPEN TE), FOUCHER Fabrice (UNIV ORLEANS FRANCE), BREQUIGNY Pierre (UNIV ORLEANS FRANCE)
SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, Vol. 2, No 2, 2020, pp. 567-585, doi : 10.4271/2019-24-0073

Technologies moteurs

- **SWUMBLE™ 3-cylinder high efficiency gasoline engine for future electrified powertrains**

LEROY Thomas (IFPEN, Carnot IFPEN TE), GAUTROT Xavier (IFPEN, Carnot IFPEN TE), MARTINEZ ALVARADO Luis Enrique (IFPEN, Carnot IFPEN TE), NOWAK Ludovic (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Aachen Colloquium China Sustainable Mobility, 10th, Pekin (Chine), 11-13 novembre 2020

- **Experimental assessment of new insulation coatings for lean burn spark-ignited engines**

CHEREL Jerome (IFPEN, Carnot IFPEN TE), ZACCARDI Jean-Marc (IFPEN, Carnot IFPEN TE), BOUTEILLER Bernard (Saint Gobain Cavaillon France), ALLIMANT Alain (Saint Gobain Cavaillon France)
Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles, Vol. 75, 2020, Article No 11, 13 p. doi : 10.2516/ogst/2020006

- **The potential of spark assisted auto-ignition combustions for high indicated efficiency gasoline engines**

CORDIER Matthieu (IFPEN, Carnot IFPEN TE), DECHAUME David (IFPEN, Carnot IFPEN TE), DUFFOUR Florence (IFPEN, Carnot IFPEN TE), COLLIUO Thierry (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
SIA Powertrain & energy, Rouen, France, 16-19 novembre 2020

- **Assessing the efficiency of a new gasoline compression ignition (GCI) concept**

CRACKNELL Roger (Shell Global Solutions Royaume-Uni), BASTAERT Dimitri (PSA France), HOUILLE Sebastien (PSA France), CHATELAIN Julien (Danielson Engineering France), LARGUIER Olivier (Danielson Engineering France), BEAUGE Yvon (Everest Team France), GENTE Florian (CIRTEM France), NICOLAS Baptiste (CERTAM France), PREVET Sylvain (CERTAM France), FANDAKOV Alexander (IAV Allemagne), RIEB Michael (IAV Allemagne), COSTENOBLE Ortwin (NEN Energy Pays-Bas), DE GROOT Timo (NEN Energy Pays-Bas), DUFFOUR Florence (IFPEN, Carnot IFPEN TE), PELLEGRINI Leonardo (ENI Italie), ROGERSON John (INCIBI Royaume-Uni), HAMJE Heather (CONCAWE Belgique)
SAE International powertrains fuels & lubricants meeting, Cracovie (Pologne), 22-24 septembre 2020, SAE 2020-01-2068, doi : 10.4271/2020-01-2068

Carburants et additifs

- **Study of simple detection of gasoline fuel contaminants contributing to increase particulate matter emissions**

BEN AMARA Arij (IFPEN, Carnot IFPEN TE), LACOUÉ-NEGRE Marion (IFPEN, Carnot IFPEN TE), GONCALVES David (IFPEN, Carnot IFPEN TE), TEBIB Melinda (IFPEN, Carnot IFPEN TE), LIDA Yukata (Toyota Japon), NOMURA Takashi (Toyota Japon), LEVEQUE Isabelle (IFPEN, Carnot IFPEN TE), SOUCHON Vincent (IFPEN, Carnot IFPEN TE), MATRAT Mickael (IFPEN, Carnot IFPEN TE), STARCK Laurie (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
WCX SAE World congress experience, Detroit (Etats-Unis), 21-23 avril 2020, SAE 2020-01-0384, doi : 10.4271/2020-01-0384.

- **Impacts of ethanol level and aromatic hydrocarbon structure in the fuel on the particle emissions from a gasoline direct injection vehicle**

TAHTOUH Toni (IFPEN, Carnot IFPEN TE), ANSELMINI Patricia (IFPEN, Carnot IFPEN TE), MATRAT Mickael (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
SAE International powertrains fuels & lubricants meeting, Cracovie (Pologne), 22-24 septembre 2020, SAE 2020-01-2194, doi : 10.4271/2020-01-2194

Contrôle des émissions polluantes

- **Neutral air quality impact vehicle for urban areas : NMHC and NH3 adsorption during cold start for ICE based power-trains**

NORSIC C. (EMC Acheres France), BOURHIS Guillaume (IFPEN, Carnot IFPEN TE), LECOMTE Matthieu (IFPEN, Carnot IFPEN TE), JEUDY Eric (IFPEN, Carnot IFPEN TE), BARBERA-ITALIANO Katia (IFPEN, Carnot IFPEN TE), LAIGLE E. (Aramco Fuel Research Center France), CHAILLOU Christophe (Aramco Fuel Research Center France)
THIESEL Thermo and fluid dynamic processes in direct injection engines, Valence (Espagne), 8-11 septembre 2020

- **CO₂ emissions reduction through a new multi-functional fluid for simultaneous NOx and Particles abatement**

ZINOLA Stephane (IFPEN, Carnot IFPEN TE), PASQUIER David (IFPEN, Carnot IFPEN TE), TRELA-BAUDOT Emmanuelle (IFPEN, Carnot IFPEN TE), MELGAR SOSSA Joris (IFPEN, Carnot IFPEN TE), OBIOLS Jerome (TOTAL France), COLLIN Annabelle (TOTAL France)
SAE International powertrains fuels & lubricants meeting, Cracovie, Pologne, 22-24 septembre 2020, doi : 10.4271/2020-01-2170

- **Les colonnes de lavage pour traiter l'air de milieux semi-confinés (parkings, tunnels routiers, enceintes ferroviaires) : premiers tests en laboratoire**

ALIX Pascal (IFPEN, Carnot IFPEN TE), LEBLANC Mickael (IFPEN, Carnot IFPEN TE), UZIO Denis (IFPEN, Carnot IFPEN TE), COQUARD Aurelien (IFPEN, Carnot IFPEN TE), KOLENDA Frederic (IFPEN, Carnot IFPEN TE)
Atmos'Fair, Paris, France, 23-24 juin 2020



Maquette : IFPEN
Mise en page : ExeAtelierTypao
Photos : © Adobe Stock, IFPEN, X. - 2106

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2020

INNOVER
LA MOBILITÉ



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