



—
INNOVER
LES ÉNERGIES
+

2021 **RAPPORT
D'ACTIVITÉ**

NOTRE MISSION

IFPEN, L'ESSENTIEL

Mission & présentation 01_

Le message de Pierre-Franck Chevet,
président d'IFPEN 02_

La gouvernance d'entreprise 04_

L'actualité 2021 d'IFPEN : panorama 06_

Données sociales & financières 10_

DÉVELOPPER AUJOURD'HUI LES INNOVATIONS DE DEMAIN

Climat, environnement
et économie circulaire 13_

Énergies renouvelables 17_

Mobilité durable 21_

Hydrocarbures responsables 25_

Une recherche fondamentale
au service de l'innovation 29_

ENCOURAGER ET SOUTENIR L'INNOVATION 33_

FORMER LES TALENTS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE 37_

CONTEXTE

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE
ET LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

+ ENJEUX



FAVORISER UNE MOBILITÉ
DURABLE



DIVERSIFIER LE MIX
ÉNERGÉTIQUE

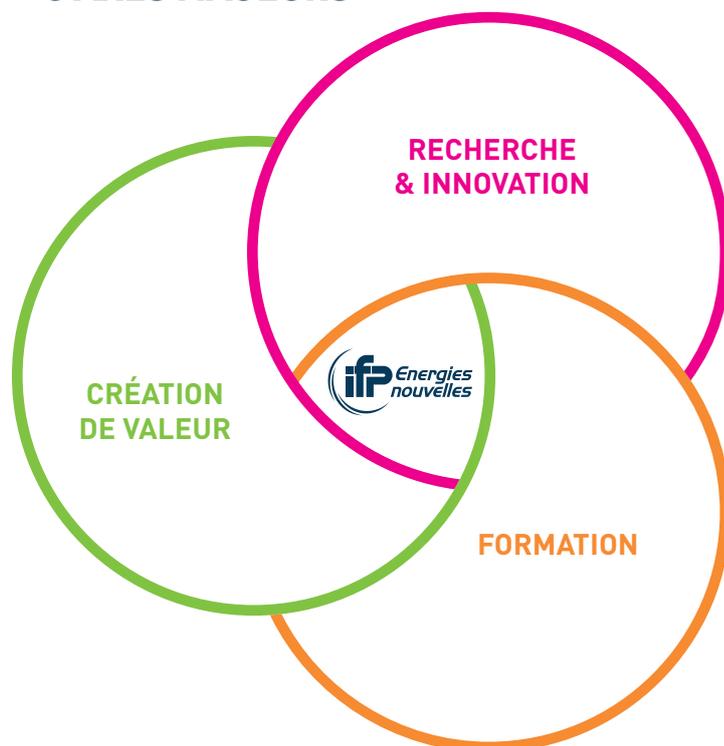


GAGNER EN EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE



RÉDUIRE L'IMPACT
ENVIRONNEMENTAL
DES RESSOURCES FOSSILES

+ 3 AXES MAJEURS



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 ses 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 tous les ans un diplôme à plus de 500 étudiants issus du monde entier.

LE MESSAGE DE PIERRE-FRANCK CHEVET

PRÉSIDENT D'IFPEN



2021 : **COLLABORATION ET DIGITALISATION**

En 2021, les équipes d'IFPEN ont su faire face à la double crise économique et sanitaire – alors que la Covid-19 nous imposait son tempo pour la deuxième année consécutive – et mener de front recherche fondamentale et recherche appliquée au service de la transition écologique. Je citerai à titre d'exemple l'achèvement de la construction du pilote 3D de captage de CO₂ installé sur le site d'ArcelorMittal à Dunkerque, l'entrée dans la phase d'industrialisation et de commercialisation de la technologie BioTfuel® de production de biojet à partir de biomasse non alimentaire, la mise au point d'un moteur à combustion hydrogène pour les poids lourds, la première industrielle d'une machine électrique haute tension et la forte augmentation des projets de recherche retenus aux niveaux national et européen.

Pour IFPEN, 2021 a fait rimer collaboration et digitalisation. Le soutien aux PME et start-up innovantes a nettement progressé : grâce à la prospection digitale, nous avons plus que doublé le nombre de contrats signés. Par ailleurs, je me réjouis de notre association avec Bpifrance. La convergence entre nos compétences et nos réseaux va favoriser le transfert des résultats de la recherche par la création de start-up dans quatre domaines clés de la transition écologique : la mobilité durable, l'économie circulaire, l'efficacité énergétique et la qualité de l'air.

La visibilité et la notoriété d'IFP School ont été développées grâce à la montée en puissance de la digitalisation.

Notre école a de plus obtenu le label « *Happy at school* », gage du bien-être des étudiants. Par ailleurs, depuis juin, le nouveau laboratoire de réalité virtuelle LAB e.NOV™ permet de réaliser des formations immersives pour les étudiants et d'envisager des applications de cette technologie à l'ensemble d'IFPEN.

2021 a également été une année d'ouverture et de coopération au sein de l'écosystème de la recherche.

Je suis fier que nous ayons été retenus comme copilotes pour trois programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), liés à la décarbonation de l'industrie, aux produits biosourcés et biocarburants, et à la digitalisation des mobilités. La feuille de route pour la décarbonation de l'industrie a été élaborée en un temps record avec les acteurs nationaux engagés sur le sujet, ce qui illustre la reconnaissance de nos compétences et notre capacité à travailler avec nos partenaires des autres instituts de recherche au service de l'intérêt général.

Résolument tournés vers l'avenir, nous avons lancé en 2021 la démarche stratégique collective « Horizon 2035 », dont l'objectif est de réfléchir au positionnement, aux activités et à la trajectoire d'IFPEN à cet horizon temporel. Il pouvait sembler osé de prendre en ce moment du temps pour réfléchir. C'est justement parce que nous sommes en temps de crise qu'il me semble opportun de nous interroger sur la manière et les moyens avec lesquels nous voulons et nous allons rebondir et nous adapter. À travers des groupes de travail mobilisant un grand nombre de salariés représentatifs de la diversité qui fait la richesse de notre organisme, j'ai souhaité que nous envisagions l'orientation que nous voulons prendre en termes de choix technologiques et que nous repensions notre identité. Des premières conclusions et actions à mener ont été définies. Les travaux vont continuer en 2022 avec, entre autres, la mise en place d'un comité des parties prenantes de l'énergie invitant l'ensemble des acteurs de la société intéressés et concernés par la transition écologique à confronter leurs visions.

Vous trouverez dans ce rapport d'activité un panorama représentatif des remarquables résultats collectifs obtenus en 2021 par des équipes engagées, convaincues et enthousiastes.

Bonne lecture !

Malgré les contraintes, les équipes d'IFPEN ont su faire face et mener de front recherche fondamentale et recherche appliquée au service de la transition écologique.



LA GOUVERNANCE D'ENTREPRISE

LE COMITÉ **EXÉCUTIF***

DIRECTION GÉNÉRALE



Pierre-Franck Chevet
Président



Catherine Rivière
Directrice générale adjointe
Recherche et innovation



Éric Lafargue
Directeur général adjoint
Administration
et gestion des filiales

DIRECTEURS DES CENTRES DE RÉSULTATS



Éric Heintzé
Ressources énergétiques



Jean-Pierre Burzynski
Procédés



Gaëtan Monnier
Transports



Christine Travers
Formation



Nathalie Alazard-Toux
Développement industriel

AUTRE MEMBRE DU COMITÉ EXÉCUTIF



Véronique Ruffier-Meray
Directrice des Ressources
humaines

* Au 31 décembre 2021

LE CONSEIL D'ADMINISTRATION*

REPRÉSENTANTS DE L'ÉTAT

Pierre-Franck Chevet
Président

Frédéric Ravel
Directeur scientifique du secteur « Énergie, développement durable, chimie et procédés » au service de la stratégie de la recherche et de l'innovation à la direction générale pour la Recherche et l'innovation, représentant le ministre chargée de la Recherche

Alicia Saoudi
Cheffe de bureau. Bureau de l'énergie, des participations, de l'industrie et de l'innovation (BEPII) à la direction du Budget, représentant le ministre chargé du Budget

Marie-Solange Tissier
Présidente de la section Régulation-ressources du Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies, représentant le ministre chargé de l'Industrie

PERSONNALITÉS QUALIFIÉES

Monique Axelos
Directrice scientifique Alimentation et bioéconomie, unité collègue de direction, INRAE

François Dassa
Directeur de la mission Prospective et relations internationales d'EDF, au sein de la direction Innovation, responsabilité d'entreprise, stratégie

Carla Gohin
Directrice de la Recherche, de l'innovation et des technologies avancées de Stellantis

Didier Holleaux
Directeur général adjoint d'Engie

Helle Kristoffersen
Directrice générale Stratégie innovation et membre du comité exécutif de TotalEnergies

Hervé Le Treut
Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS

Sophie Paturle-Guesnerot
Fondatrice associée de Demeter Partners

Axel Plasse
Directeur R&D et marketing, Valeo powertrain systems, Transmission systems product group

Valérie Quiniou-Ramus
Directrice exécutive de la Prospective et de la recherche (DEPR) de l'Ademe

Bruno Sportisse
Président-directeur général d'Inria

REPRÉSENTANTS DES SALARIÉS

Laurent Duval
Sylvie Perrin

ASSISTENT EN OUTRE AU CONSEIL D'ADMINISTRATION

Cyril Bouyeure
Contrôleur général économique et financier (CGEfi), ministère de l'Économie, des finances et la relance, mission « Énergie »

Philippe Geiger
Commissaire du gouvernement auprès d'IFPEN, directeur adjoint à la direction de l'énergie – DGEC – ministère de la Transition écologique

Guillaume Gougeul
Secrétaire du comité social et économique central (CSEC) d'IFPEN

LE CONSEIL SCIENTIFIQUE*

Grégoire Allaire
Président du conseil scientifique, professeur de mathématiques appliquées à l'École polytechnique, professeur des universités de classe exceptionnelle

Carmen Claver
Professeur de chimie inorganique à l'université Rovira i Virgili de Tarragone

Christophe Coperet
Professeur de chimie moléculaire et titulaire de la chaire de chimie de surface et interfaces à l'École polytechnique fédérale de Zürich

Marc-Olivier Coppens
Ramsay Memorial professor et directeur du département de génie chimique à University College de Londres

Patrick Criqui
Directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe d'économie du développement durable et de l'énergie du laboratoire GAEL, du CNRS et de l'université Grenoble Alpes

Luigi Del Re
Professeur à l'université Johannes Kepler de Linz, directeur de l'Institute of design and control of mechatronical systems

Sylvie Dequin
Chef de département Microbiologie et chaîne alimentaire à INRAE

Jocelyne Erhel
Directrice de recherche à Inria

Mohamed Gabsi
Professeur et directeur du département électronique-électrotechnique à l'École normale supérieure de Paris-Saclay

Anke Lindner
Professeur de physique à l'université Paris Diderot et chercheur au laboratoire de physique et mécanique des milieux hétérogènes à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de Paris

Jean-François Minster
Président de l'Institut photovoltaïque d'Île-de-France

Christine Rousselle
Professeur en combustion et diagnostics optiques à l'université d'Orléans, déléguée au TCP clean and efficient combustion de l'AIE

Marc Schoenauer
Directeur de recherche à Inria

Luc Vervisch
Professeur des universités à l'Institut national des sciences appliquées de Rouen

Sophie Violette
Maître de conférences-HDR, Sorbonne Université – laboratoire de géologie de l'ENS

L'ACTUALITÉ 2021 D'IFPEN : PANORAMA



+ PLAN FRANCE RELANCE : IFPEN, COPILOTE DE TROIS PEPR

Lors de la présentation du plan France Relance le 29 juin 2021, le Premier ministre a annoncé le lancement de 13 stratégies d'accélération pour l'innovation s'inscrivant dans le cadre du quatrième Programme d'investissements d'avenir (PIA4).

Objectif : identifier les principaux enjeux économiques et technologiques d'avenir et y investir de façon exceptionnelle. Ces stratégies sont accompagnées de programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), dotés de pilotes chargés de porter ces programmes. IFPEN a été choisi pour copiloter le PEPR lié à la stratégie d'accélération sur la décarbonation de l'industrie avec le CNRS, le PEPR sur les produits biosourcés et les carburants durables avec INRAE et le PEPR sur la digitalisation et la décarbonation des mobilités avec l'université Gustave Eiffel. Par ailleurs, IFPEN a été sollicité dans le cadre de la construction du PEPR Hydrogène de la stratégie d'accélération du même nom et du PEPR Recyclabilité de la stratégie d'accélération recyclabilité, recyclage et réincorporation des matériaux.

+ DÉPLOIEMENT DE L'HYDROGÈNE : IFPEN MONTE EN PUISSANCE



En 2021, l'engagement d'IFPEN sur la chaîne de valeur de l'hydrogène s'est intensifié. En mai, l'étude *Hydrogen for Europe (Hydrogen4EU)* a été publiée. Sur la base de modélisations réalisées par les partenaires IFPEN, SINTEF et Deloitte, le projet vise à tracer des voies explorant le rôle de l'hydrogène dans un système énergétique européen décarboné. En juin, IFPEN et l'institut de la corrosion ont créé un groupe d'étude du comportement des matériaux en présence d'hydrogène, dans l'optique de fédérer des partenaires industriels autour de cette thématique. Également en juin a été organisé le 5^e « RDV IFPEN de l'innovation énergétique », autour des conditions du déploiement de l'hydrogène décarboné dans le mix énergétique français. Animée par François Kalaydjian, coordinateur hydrogène d'IFPEN, la table ronde a réuni Hoang Bui, coordonnateur de la stratégie nationale hydrogène au secrétariat général pour l'investissement, Catherine Azzopardi, directrice Environnement et énergie à la région Auvergne-Rhône-Alpes, Adamo Scenci, VP Hydrogène de TotalEnergies*, et Gaëtan Monnier, directeur du Carnot IFPEN Transports Energie. Le *replay* est disponible sur le site web d'IFPEN. Enfin, l'année a été marquée par la mise en service, en octobre, d'un nouveau banc d'essai de systèmes piles à combustible (PaC) d'une puissance de 210 kW. Situé sur le site de Solaize, cet outil d'expérimentation unique, le plus puissant de France à ce jour, permettra à IFPEN d'accélérer ses recherches sur l'utilisation des piles à combustible alimentées à l'hydrogène dans les véhicules électrifiés, notamment pour le transport routier lourd (bus, camion) et ferroviaire.

* Aujourd'hui directeur général délégué de HRS (*Hydrogen-Refueling-Solutions*)



TECHKARE
Mind your staff

LA SOLUTION D'AIDE AU DÉPLACEMENT DE CHARGES LOURDES À L'HÔPITAL PREND SON ENVOL

En juillet 2021, IFPEN, à travers le Carnot IFPEN Transports Energie, a annoncé la création de la société TechKare™, qui propose des solutions d'aide au déplacement de charges lourdes en milieu hospitalier. Dans ce cadre, un système innovant d'assistance électrique aux brancardiers a été développé. Il facilite le déplacement des patients et apporte une réponse aux enjeux de la mobilité à l'hôpital. Cette solution permet notamment de diminuer les troubles musculosquelettiques du personnel hospitalier. TechKare™ relève ainsi les défis sociétaux que sont l'amélioration des conditions de travail, le bien vieillir et l'égalité professionnelle du personnel hospitalier.

À noter : TechKare™ a été créée par essaimage (voir le rapport d'activité 2020, page 33).



DÉPÔTS DE BREVETS : IFPEN SE DISTINGUE

En 2021, IFPEN s'est classé 3^e parmi les centres de recherche déposants de brevets, juste après le CEA et le CNRS, avec 198 demandes de brevets publiées en 2020 auprès de l'INPI (190 brevets au nom d'IFPEN et 8 au nom de filiales). Rappelons également qu'IFPEN est au 4^e rang mondial pour les brevets relatifs aux technologies bas-carbone sur la période 2000-2019, dans le classement international des organismes de recherche et universités publié en avril 2021 par l'Office européen des brevets (OEB) et l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Par ailleurs, l'OEB a publié en octobre une étude « Brevets et plastiques de demain* », destinée à rendre compte des tendances mondiales en matière d'innovation dans les domaines du recyclage, de l'écoconception et des sources alternatives. IFPEN se distingue en occupant la première place au niveau mondial parmi les organismes publics de recherche déposant des brevets dans le domaine du recyclage chimique et biologique, avec 168 familles de brevets internationales (FBI).

* Brevets et plastiques de demain – Tendances mondiales en matière d'innovation dans les domaines du recyclage, de l'écoconception et des sources alternatives, Office européen des brevets, 2021.



EN VISITE SUR UN SITE BIOTFUEL®, JEAN-BAPTISTE DJEBBARI LANCE UN APPEL À PROJETS

Le 27 juillet, Jean-Baptiste Djebbari, ministre délégué chargé des Transports, s'est rendu à Venette (Oise), sur le site de torréfaction de la biomasse qui est l'un des démonstrateurs du projet BioTfuel®. Cette visite est intervenue alors que Bionext et ses partenaires ont terminé avec succès les programmes de tests sur les unités de démonstration BioTfuel®, franchissant une étape cruciale dans le développement de cette technologie pour la production de biokérosène à faible empreinte carbone (voir page 19). À l'occasion de cette visite, le ministre a annoncé le lancement d'un appel à projets qui doit permettre d'accélérer le développement d'une filière française de production de carburants durables pour l'aviation. Doté d'une enveloppe prévisionnelle pouvant aller jusqu'à 200 millions d'euros, l'appel à projets s'inscrit dans le cadre du programme d'investissement d'avenir (PIA) et sera financé par France Relance.



« **WOMEN IN CCUS** » : UNE CHEFFE DE PROJET IFPEN PARTAGE SON EXPÉRIENCE DE FEMME DE SCIENCE

À l'occasion du *workshop* « *Women in CCUS* » organisé dans le cadre du projet européen C4U, la coordinatrice du projet européen 3D et cheffe de projet IFPEN sur DINAMX, Vania Santos-Moreau, est venue partager son expérience de femme de science avec « *3D Project : The power of women!* ». Ce témoignage a offert à IFPEN l'opportunité de présenter sous un angle original son expertise sur le CCUS et la réussite d'un collectif. Le « pouvoir au féminin » mis en avant par Vania Santos-Moreau provient tant de l'engagement des ingénieur(e)s et technicien(ne)s d'IFPEN et d'Axens au service du projet, que de l'importance de modèles au sein d'IFPEN : des femmes qui lui ont montré l'exemple et lui ont permis d'oser à son tour.



PIERRE-FRANCK CHEVET DEVIENT LE NOUVEAU PRÉSIDENT DE L'ANCRE



Pierre-Franck Chevet a été nommé président de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (Ancre) pour une durée de deux ans. Désigné, dans le cadre d'une présidence bisannuelle tournante, par le comité de coordination de l'alliance composé des quatre membres fondateurs (CEA, CNRS, CPU et IFPEN) et du représentant des membres associés (BRGM), il succède à Mohammed Benlahsen, président de l'université de Picardie Jules-Verne. Il poursuivra l'action de l'alliance visant à renforcer les liens et les échanges entre les organismes de recherche, les agences et les ministères de tutelle ; ces rapprochements contribueront en effet à l'atteinte des objectifs sur la transition énergétique sur les plans national et européen. Autre enjeu majeur, Pierre-Franck Chevet a également pour objectif de « *construire sur plus d'interdisciplinarité et de transversalité avec les sciences humaines et sociales, dans le but d'avoir une compréhension plus complète des problématiques* », ce qui amènera par exemple à développer davantage les analyses de cycle de vie multicritères dans le cadre des travaux de l'Ancre.



FOCUS

La revue *OGST (Oil and Gas Science and Technology)*, créée par IFPEN en 1946, a changé de périmètre et est devenue *STET (Science and Technology for Energy Transition)* en janvier 2022.

Ce nouveau positionnement et ce nouveau nom soulignent la stratégie d'IFPEN résolument tournée vers la transition énergétique. Pour accompagner cette évolution, IFPEN s'associe au CEA, l'autre grand organisme français de recherche dans le domaine de l'énergie.



CINQ PROJETS IFPEN FINANCÉS PAR LE VOLET IMMOBILIER DU PLAN DE RELANCE



Dans le cadre du volet immobilier du plan de relance, IFPEN bénéficie du financement de plusieurs projets sur son site de Solaize. Le montant global, d'environ 8 millions d'euros, permettra d'accélérer sa démarche vers une plus grande sobriété énergétique. Les projets retenus concernent l'installation de panneaux solaires, la rénovation de certains systèmes de ventilation et d'éclairage, ainsi que l'isolation et la rénovation de la ventilation d'un bâtiment. Les travaux, dont certains ont déjà été réalisés, s'étaleront jusqu'en 2023.



+

UN SITE WEB POUR COMPRENDRE L'ÉVOLUTION DE LA MOBILITÉ EN ÎLE-DE-FRANCE

IFPEN et une trentaine d'acteurs impliqués dans la mobilité en Île-de-France se sont regroupés pour analyser l'impact de la Covid-19 sur les habitudes de transport des Franciliens au travers d'enquêtes. Le collectif Mobilité Île-de-France, qui souhaite aujourd'hui partager avec le grand public les fruits de ses travaux, a mis en ligne un site web (www.collectif-transformation-mobilite-ile-de-france.fr) à cette intention. IFPEN y met à disposition les données issues de l'observatoire de la mobilité vélo.



+

NOMINATION DE CATHERINE RIVIÈRE AU CONSEIL SCIENTIFIQUE DU CEA ET AU COMITÉ EXÉCUTIF DE L'EERA

Catherine Rivière, directrice générale adjointe Recherche et Innovation, a été nommée membre du conseil scientifique du CEA pour un mandat de quatre ans, sur proposition du haut-commissaire à l'énergie atomique. Elle a également été nommée pour un mandat de quatre ans au comité exécutif de l'EERA (*European Energy Research Alliance*), association européenne visant à soutenir le développement de technologies énergétiques sobres en carbone, plus efficaces et moins coûteuses.

+

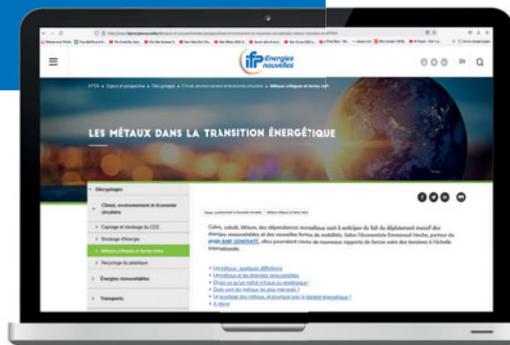
FOCUS

Les énergies renouvelables et les nouvelles formes de mobilités peuvent être coûteuses en ressources.

Pour approfondir ce point peu abordé dans les discussions autour de la transition énergétique, IFPEN a réalisé « Les métaux dans la transition énergétique », une série d'articles assortie de six podcasts.

Au programme: la géopolitique de l'aluminium, du cuivre, du nickel, du lithium, des terres rares et du cobalt.

À découvrir sur:
www.ifpennergiesnouvelles.fr



+

CHIFFRES CLÉS

2

instituts Carnot :
le Carnot IFPEN Transports
Énergie et le Carnot IFPEN
Ressources Énergétiques



ISO
CERTIFIÉ ISO
9001

pour ses activités de R&I

149



premiers dépôts
de brevets, dont

93

dans le domaine des NTE

Plus de

500



élèves diplômés
par IFP School

Nombre de contrats
avec les start-up
et les PME multiplié
par

2,5

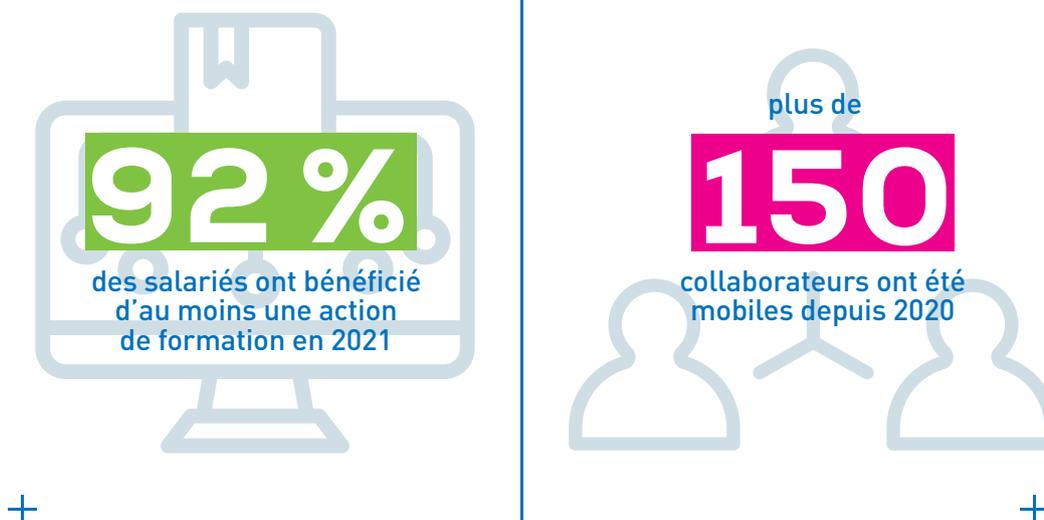
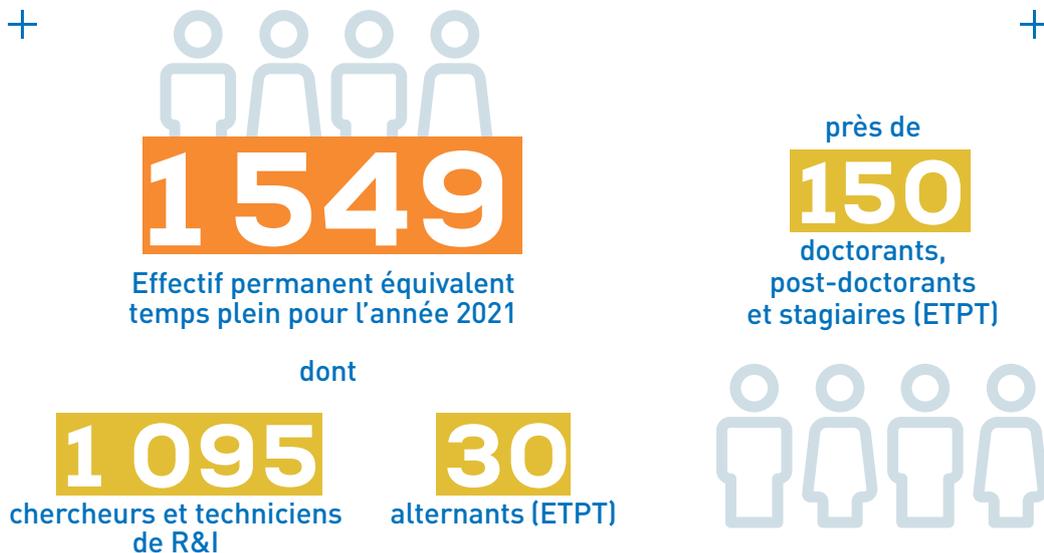
DONNÉES

SOCIALES & FINANCIÈRES

DONNÉES SOCIALES

Afin de répondre aux orientations nationales concernant la transition écologique, mobiliser efficacement les ressources de l'entreprise est un objectif qui passe par une politique de ressources humaines dynamique. Cette dernière se donne comme priorité d'identifier et d'anticiper les compétences nécessaires pour une expertise scientifique et technique de haut niveau.

Résolument engagé à former les acteurs de cette transition, IFPEN intègre chaque année de nombreux apprentis.

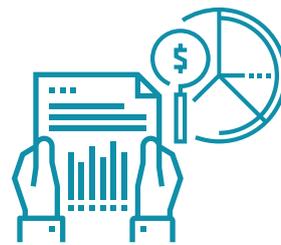
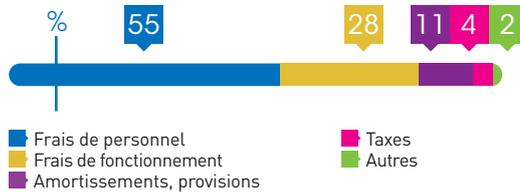


DONNÉES FINANCIÈRES

Dans un contexte de conjoncture économique défavorable en 2021 pour les filiales d'IFPEN, les ressources propres enregistrent un retrait résultant principalement d'une réduction des redevances. Corrélativement, les charges opérationnelles sont en diminution, en raison principalement des restrictions de déplacement dans le contexte de crise sanitaire. Malgré la chute des ressources propres entre 2019 et 2021, l'activité hydrocarbures demeure autofinancée *via* une réduction significative des dépenses.

RÉPARTITION DES CHARGES OPÉRATIONNELLES

Clôture 2021

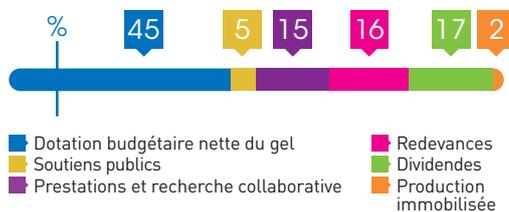


262,1 M€

dont 228 M€ pour la R&I
Charges opérationnelles

RÉPARTITION DES PRODUITS OPÉRATIONNELS

Clôture 2021



120,2 M€

Dotation budgétaire

147,7 M€

Ressources propres

68%

du budget
consacré aux NTE

POIDS DES NTE DANS LA R&I IFPEN EN 2021	%
Total NTE	68
Énergies renouvelables	24
Mobilité durable	14
Climat, environnement et économie circulaire	12
Recherche fondamentale transverse	18

DÉVELOPPER AUJOURD'HUI

LES INNOVATIONS
DE DEMAIN

CLIMAT, ENVIRONNEMENT ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE

13

+

ÉNERGIES RENOUVELABLES

17

+

MOBILITÉ DURABLE

21

+

HYDROCARBURES RESPONSABLES

25

+

**UNE RECHERCHE FONDAMENTALE AU SERVICE
DE L'INNOVATION**

29

+

CLIMAT, ENVIRONNEMENT ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE



Face à l'enjeu climatique et aux impacts négatifs des activités humaines sur l'environnement et la disponibilité des ressources, IFPEN renforce son action à travers une stratégie ambitieuse qui vise trois objectifs principaux : la décarbonation de l'industrie et la conversion du CO₂, le recyclage des plastiques et des métaux provenant de catalyseurs et de batteries, l'amélioration de la qualité de l'air et de la résilience des sols.

FAIT MARQUANT

Projet CHEERS : lancement de la construction du pilote CLC

Fin 2021, le projet sino-européen a franchi une étape cruciale avec la décision finale de TotalEnergies, Dongfang Boiler Group Co. (DBC), IFPEN et l'université de Tsinghua d'investir dans la construction d'une unité de démonstration d'une capacité de 3 MWth, avec un potentiel de 4-5 MWth en Chine. Prévus pour 2023, la campagne d'essais amènera la technologie à une maturité quasi commerciale (niveau de TRL 7).

Le projet CHEERS bénéficie d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne Horizon 2020 au titre de la convention de subvention n° 764697.



CCUS : CAP SUR LA DÉMONSTRATION DES PROCÉDÉS

Les travaux d'IFPEN dans le domaine du captage, stockage et de la valorisation du CO₂ (CCUS), via son Carnot IFPEN Ressources Énergétiques, prennent une ampleur nouvelle dans un contexte européen de plus en plus dynamique. Deux procédés de captage sont en phase de déploiement, le procédé par solvant démixant DMX™, pour lequel un pilote a été livré sur le site d'ArcelorMittal à Dunkerque, et le procédé Cheers de combustion en boucle chimique (CLC) avec un démonstrateur en Chine. La démonstration de ces deux solutions sera lancée en 2022. 2021 a vu le lancement du projet PilotSTRATEGY sur l'évaluation des capacités de stockage des aquifères salins profonds, piloté par le BRGM. Par ailleurs, IFPEN élabore pour les pouvoirs publics et les industriels des stratégies de déploiement, ainsi que des analyses de cycle de vie et des études d'impact.



FOCUS

En 2021, IFPEN a été choisi pour copiloter avec le CNRS le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) lié à la stratégie d'accélération sur la décarbonation de l'industrie (voir page 6).

FAIT MARQUANT

Projet 3D : le pilote du procédé DMX™ livré à Dunkerque

Le projet européen 3D, visant à démontrer les performances du procédé DMX™ pour capter le CO₂ présent dans les gaz de haut-fourneau, a franchi une étape clé en 2021. En effet, le pilote conçu par IFPEN via son Carnot Ressources Énergétiques et Axens et construit par la société ETCI à Lens a été installé sur le complexe sidérurgique d'ArcelorMittal de Dunkerque. Dès 2026, 125 tonnes de CO₂/h seront captées, soit 1 million de tonnes de CO₂/an. À l'horizon 2030, le pôle européen de Dunkerque-Mer du Nord pourra alors capter, transporter et stocker en mer du Nord plus de 10 millions de tonnes de CO₂/an.

Le projet 3D bénéficie d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne Horizon 2020 au titre de la convention de subvention n° 838031.



+
**UNE GAMME
D'OUTILS
AU SERVICE
DE LA QUALITÉ
DE L'AIR**



Les travaux sur la qualité de l'air, menés conjointement par le Carnot IFPEN Ressources Energétiques et le Carnot IFPEN Transports Energie, bénéficient d'une stimulante association de compétences et de moyens au service des territoires et des collectivités. L'année 2021 a été marquée par la mise à disposition de deux nouveaux outils pour la qualité de l'air, Real-e™, qui mesure les polluants émis par un véhicule en déplacement, et la suite Flair, destinée à la surveillance de sites industriels de stockage, de géothermie, etc. Par ailleurs, l'offre d'écomobilité Gecoair™, qui s'adresse aux particuliers, a été renforcée par une fonctionnalité qui permet d'anticiper les aléas climatiques.

+
FAIT MARQUANT



Depuis début 2021, le Carnot IFPEN Transports Energie et la PME Capelec, fournisseur d'équipements en contrôle technique automobile, proposent un analyseur mobile et connecté innovant, Real-e™ (Real emissions). Real-e™ mesure, en situation réelle et avec une grande fiabilité, les polluants émis à l'échappement par les véhicules en circulation et permet d'identifier rapidement les véhicules non conformes avec la réglementation. Il se présente sous la forme d'une mallette connectée contenant un analyseur de gaz d'échappement (CO, CO₂, NO_x, PN, NH₃), qui prélève les polluants en continu, et d'un système de diagnostic embarqué qui recueille les paramètres du véhicule. Grâce à ce dispositif, la mise au point des véhicules ou la surveillance d'un parc automobile sont plus simples, plus rapides et moins coûteuses qu'avec les systèmes existants.



**Interview de
Pierre Chiquet,
responsable du service
Géosciences de Teréga**

Le partenariat avec IFPEN a commencé en 2017 sur la thématique du suivi de l'intégrité de nos stockages de gaz naturel. La FlairCar™ a permis de détecter les pertes diffuses, au sol et dans l'air ambiant, et d'en déterminer l'origine. Les campagnes ont uniquement mis en évidence des productions de gaz biogénique (produit par les bactéries à partir de la matière organique). En 2021, à la suite des tests sur terrain d'un prototype de la FlairBox™, nous avons initié une collaboration destinée à mesurer à de très faibles teneurs la molécule olfactive que nous ajoutons au gaz naturel, le THT. Ce partenariat a pour objectif de répondre à des obligations réglementaires pour les installations industrielles pouvant générer des odeurs en cas de crise. Au-delà de la réglementation, ces développements nous serviront également à améliorer nos procédés en matière de gestion de la qualité de l'air. »

+
FAIT MARQUANT

Flair : un ensemble d'outils au service de la surveillance environnementale et de la qualité de l'air

Les travaux menés en surveillance environnementale par le Carnot IFPEN Ressources Energétiques ont abouti en 2021 à la gamme d'outils Flair, une riche panoplie de capteurs et de logiciels qui permet d'explorer une zone géographique donnée pour détecter les polluants d'origine naturelle ou industrielle, les visualiser sur une carte, en connaître l'origine et la dispersion future. Les applications vont de la détection de fuite de gaz à l'évaluation de la qualité de l'air, en passant par l'étude du sol et de sa respiration, ou encore celle des rejets de gaz à effet de serre.

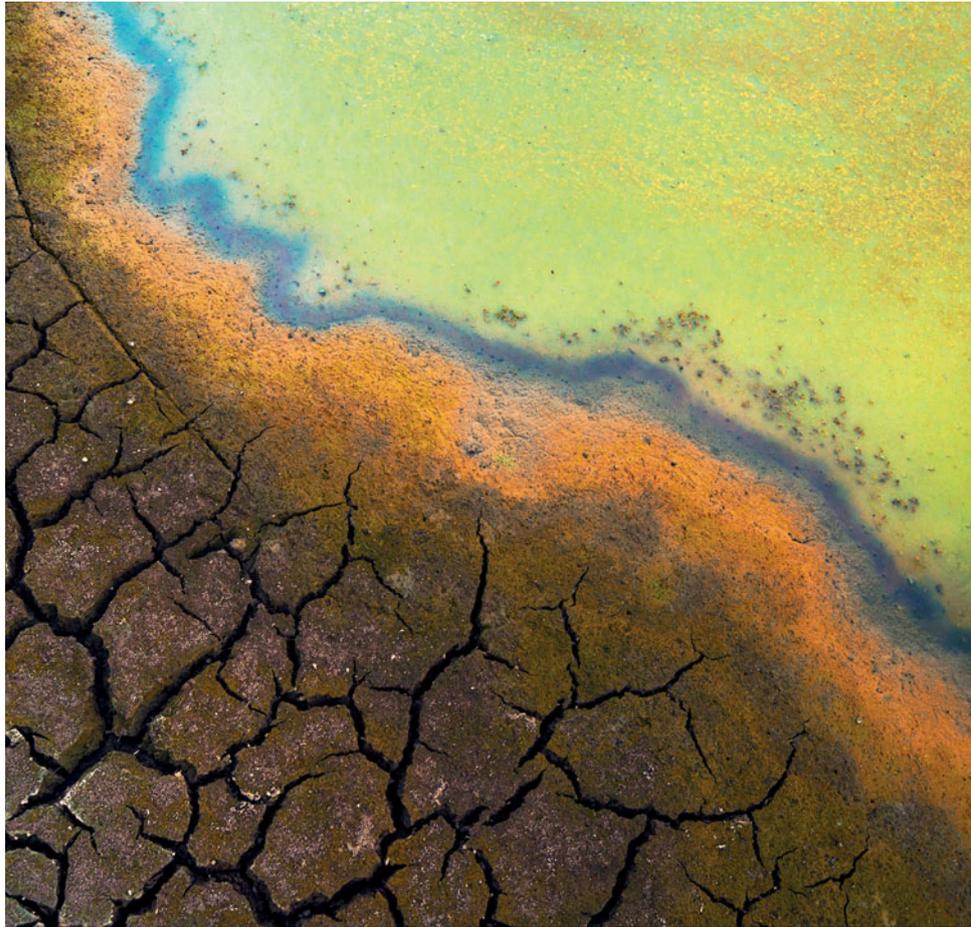




CLIMAT, SOL ET CYCLE DE L'EAU : UNE MINE D'INTERACTIONS À EXPLORER

Les interactions entre le sol, second réservoir de carbone sur terre, le climat et le cycle de l'eau sont d'année en année mieux comprises et étudiées.

À la suite de la feuille de route mise en place en 2020 (voir le rapport d'activité 2020, page 14), le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques a poursuivi en 2021 trois objectifs. D'une part, des travaux de suivi des stocks de carbone des sols agricoles et forestiers ont été menés (le stockage de carbone dans les sols pourra contribuer à la neutralité carbone à l'horizon 2050). Par ailleurs, des études en cours quantifient la pollution par les microplastiques dans le sol. Enfin, des travaux de recherche visent à sécuriser l'accès à l'eau douce en quantité et qualité suffisantes par la gestion de la ressource, l'optimisation des usages des eaux industrielles et leur traitement, ainsi que la gestion des eaux de ruissellement.



FAIT MARQUANT

Le consortium VULCAR-FATE et la préservation de la biosphère

Le projet international VULCAR-FATE (*Global change impact on vulnerable carbon reservoirs : carbon sequestration and emissions in soils and waters From the Arctic To the Equator*) a été lancé en juin 2021 dans le cadre de l'appel à projets du Belmont-Forum « Vers la durabilité des sols et des eaux souterraines pour la société ». Financé par l'ANR, la National Science Foundation et la Russian Foundation for Basic Research, et coordonné par l'IRD, il étudie deux écosystèmes et y évalue l'impact des changements climatiques récents et des usages des sols.

Objectif : définir des scénarios d'évolution à 30-100 ans afin d'adapter les politiques locales. Les équipes du Carnot caractérisent la matière organique des sols grâce à la méthode thermique Rock-Eval® et modélisent les processus géologiques et les flux d'eau et de sédiments grâce au simulateur DionisosFlow™.



FAIT MARQUANT

Deux projets pour comprendre le rôle des microplastiques dans les sols

Les projets sélectionnés en 2021 par l'ANR et l'Ademe vont permettre d'étudier l'impact de la présence des microplastiques (MP) dans les sols.

Le projet e-DIP, financé par l'ANR, évaluera la toxicité des MP dans les différents compartiments du sol et leur impact sur les cycles biogéochimiques suivant qu'ils sont apportés directement ou mélangés à des amendements organiques. Le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques étudiera l'impact direct ou indirect (en perturbant l'activité microbienne) des MP sur la qualité de la matière organique des sols en utilisant les méthodes Rock-Eval® dédiées aux études des sols.

Le projet Plastisol, financé par l'Ademe, complètera cette étude en fournissant des indicateurs de la présence de matières plastiques dans les sols.



RECYCLAGE CHIMIQUE DES PLASTIQUES: IFPEN DÉVELOPPE DES TECHNOLOGIES DE POINTE

IFPEN mène depuis bientôt dix ans des projets de recherche dans le domaine du recyclage chimique des déchets plastiques.

La réduction de ces déchets, issus notamment des secteurs de l'automobile, de l'électroménager, des emballages, du bâtiment ou de l'agriculture, nécessite en effet, outre une modification des habitudes de consommation, des réponses technologiques. Ainsi IFPEN, en partenariat avec les acteurs de la filière pour favoriser un passage plus rapide en phase industrielle, développe des technologies de pointe qui visent à traiter presque tous les types de plastiques en complément du recyclage mécanique, afin d'offrir des solutions aux industriels permettant de répondre aux attentes sociétales et se conformer aux politiques publiques relatives à l'économie circulaire. IFPEN occupe d'ailleurs la 5^e place au niveau mondial des déposants de brevets dans le domaine du recyclage chimique et biologique entre 2010 et 2019 (étude de l'Office européen des brevets parue en 2021). IFPEN a pour objectif d'être présent sur les différentes boucles de recyclage chimique. Les projets en cours portent, par exemple, sur la conversion du plastique par pyrolyse. En 2021, les travaux dans ce domaine ont abouti au développement, en partenariat avec Repsol et Axens, du procédé RewindT[®]Mix qui purifie les huiles de pyrolyse de plastiques permettant leur traitement direct dans les usines pétrochimiques existantes pour la production de plastiques recyclés. Par ailleurs, les travaux de démonstration du procédé de recyclage de PET par dépolymérisation Rewind[®]PET, menés en partenariat avec Jeplan et Axens, se poursuivent avec une commercialisation visée pour fin 2023. Citons également les travaux conduits avec un partenaire sur le recyclage du plastique par dissolution et purification des polyoléfinés, qui permet d'extraire les additifs et polluants du plastique.



**Interview de
Wilfried Weiss,
chef de projet purification
des pyrolysats de plastiques**



Nous avons mis au point, avec nos partenaires Repsol et Axens, un procédé pour la purification des huiles de pyrolyse de déchets plastiques. Le traitement des impuretés qu'elles contiennent, comme le silicium, les composés chlorés, les dioléfinés et les métaux, va permettre l'utilisation directe et non diluée de ces huiles dans les installations de vapocraquage existantes. Ce traitement permettra ensuite la production d'intermédiaires chimiques qui serviront de base pour la synthèse de plastiques recyclés. Le procédé Rewind[®] Mix a été mis au point dans les installations de Repsol et d'IFPEN avec des essais pilotes approfondis sur des huiles de pyrolyse de haute qualité. Nous allons poursuivre nos travaux pour adapter cette technologie à des charges plus difficiles afin d'aller plus loin dans le recyclage chimique des plastiques. »

+ MÉTAUX CRITIQUES ET TERRES RARES, UN ENJEU CLÉ

L'approvisionnement en métaux critiques devient un enjeu majeur.

Ainsi, depuis 2020, IFPEN instruit des projets de développement de procédés de recyclage des métaux issus de catalyseurs usés et de batteries. L'objectif : développer des procédés et des solutions viables économiquement pour assurer les étapes de transformation de la matière, nécessaire au recyclage des métaux comme le cobalt, le nickel, ou le lithium dont la demande a crû à un rythme soutenu ces dernières années. IFPEN a par ailleurs développé avec Eramet un adsorbant pour capter le lithium de manière sélective et respectueuse de l'environnement dans les eaux des salars d'Argentine. Ce procédé intégrant l'adsorbant a été adapté aux eaux géothermales du bassin rhénan dans le cadre du projet européen EuGeLi (*European Geothermal Lithium Brine*).

+ LA CONVERSION DU CO₂ ET H₂ RENOUEVABLE

En complément des biocarburants, les électrofuels (ou e-fuels) sont appelés à jouer un rôle dans les transports décarbonés (projet de refonte Directive REDII et projet Refuel Aviation EU proposés par la Commission européenne le 14 juillet 2021). IFPEN conduit différentes instructions pour développer des technologies de production d'e-fuels ou d'e-biofuels originales qu'il conviendra de démontrer industriellement.

ÉNERGIES RENOUVELABLES



Pour répondre à la demande en énergies renouvelables, IFPEN développe des procédés pour produire des bioproduits et des biocarburants de seconde génération. IFPEN élabore aussi des outils destinés au développement des énergies marines et notamment des éoliennes flottantes. Enfin, pour accompagner l'essor des énergies non pilotables et l'électrification croissante de l'économie, IFPEN améliore les technologies de stockage et de gestion de l'énergie.

FAIT MARQUANT

WiSE WindField : une prédiction plus précise du vent

Dans le cadre du partenariat engagé depuis 2015 avec Leosphere, leader mondial de la mesure du vent par Lidar, IFPEN a finalisé en 2021 la mise en œuvre industrielle de la solution logicielle embarquée WiSE WindField, qui reconstitue le champ de vent incident à partir des données d'un Lidar placé sur une éolienne. Issu d'une expertise en traitement du signal et automatique, cette solution fournit en temps réel une haute précision de mesure et un contrôle des aléas du vent, améliorant ainsi le pilotage et la performance des éoliennes avec, à la clé, des économies et une durée plus longue d'exploitation. La plus grande adaptabilité des éoliennes au vent ainsi obtenue permet également d'optimiser leur design, par exemple en augmentant la longueur des pales, afin de réduire les coûts d'investissement et de maximiser la production d'énergie.



ÉOLIEN ET ÉNERGIES MARINES : UN NOUVEAU SOUFFLE

L'éolien offshore est fortement encouragé par l'Union européenne qui a réaffirmé en novembre 2021 l'ambition d'en faire une énergie majeure, avec l'objectif de disposer d'une puissance installée de 60 GW dès 2030 et d'au moins 300 GW en 2050. Porté par cet élan, le Carnot IFPEN Ressources Energétiques a intensifié ses efforts sur la conception de flotteurs, le contrôle d'éoliennes et de parcs éoliens et le développement d'un jumeau numérique qui optimise la production et la maintenance d'un parc d'éoliennes. Par ailleurs, les recherches sur le contrôle des systèmes houlomoteurs se sont poursuivies avec une étude pour la société *Carnegie Clean Energy* sur le contrôle du module CETO.

FAIT MARQUANT



Des champs de vents réalistes grâce au Lidar et à des algorithmes prédictifs

Des travaux ont été réalisés par le Carnot IFPEN Ressources Energétiques en collaboration avec Equinor, visant à améliorer le dimensionnement et les calculs de charge d'éoliennes flottantes en générant des champs de vent réalistes à partir de mesures Lidar nacelle. Ces travaux ont été évalués expérimentalement avec des données provenant du parc éolien flottant « *Hywind Scotland wind farm* ». Ils ont notamment abouti à la publication d'un poster scientifique à la conférence WindEurope Electric City 2021, qui a reçu le prix « WindEurope Poster Award » décerné par EAWE (*European Academy of Wind Energy*).

FAITS MARQUANTS

IFPEN, Engie Green et Engie Digital donnent naissance au jumeau numérique d'un champ d'éoliennes terrestres.

En collaboration avec Engie Green et Engie Digital, les équipes du Carnot IFPEN Ressources Energétiques ont développé un « *Digital Twin* » (jumeau numérique) de la ferme d'éoliennes « La Sole du Moulin Vieux » dans les Hauts-de-France, pour laquelle des données sur 11 ans sont disponibles. Grâce à des algorithmes mêlant modélisation physique et science des données, l'usure mécanique des composants des éoliennes (pales, mât et rotor) a été estimée. Ces algorithmes, validés par des mesures sur site, donnent des indicateurs clés de performance comme l'estimation des charges subies par les composants, et de leur durée de vie, permettant ainsi de détecter des défaillances ou des sous-performances. Ce jumeau numérique a donné lieu à un nouvel outil : Wind Avatar®.



IFPEN et TotalEnergies réalisent une étude pour évaluer la production des éoliennes flottantes

IFPEN, via son Carnot Ressources Energétiques et TotalEnergies ont mis en commun leurs efforts pour évaluer l'impact du mouvement d'une éolienne flottante sur sa production d'énergie. Deux types de flotteurs ont été pris en compte et une comparaison a été faite avec le cas d'une éolienne fixe. Les écarts ont été quantifiés et leurs causes analysées. Ces travaux ont été réalisés à l'aide des outils de modélisation développés à IFPEN, notamment DeepLines Wind™ pour la simulation multiphysique d'une éolienne flottante.



DÉVELOPPEMENT DES SYSTÈMES DE STOCKAGE ET DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Le Carnot IFPEN Ressources Energétiques mise sur le développement de systèmes de stockage stationnaire d'énergie électrique à forte puissance et capacité, et consacre ses efforts à la compréhension des mécanismes de vieillissement et d'emballage thermique, pour les technologies existantes à électrolyte liquide, ou futures de type tout solide. En 2021, un prototype de système de gestion de l'énergie intégrant la recharge pilotée de véhicules électriques a aussi été réalisé avec la PME Beoga pour étudier une solution d'autoconsommation collective.

FAIT MARQUANT

Projet Ademe TranZAE: quand transition énergétique rime avec zones d'activités économiques

Le projet TranZAE, attribué par l'Ademe en 2021 et porté par CSTB, dont IFPEN via son Carnot Ressources Energétiques est partenaire avec le Cerema et Enedis, va proposer une méthodologie destinée à l'Ademe pour décarboner et revitaliser les 10 000 à 20 000 ZAE (bureaux, commerces, PME) de France, en produisant de l'énergie renouvelable dans le cadre de l'autoconsommation collective. Une base de données intégrant des données cadastrales fournies par IGN et des données électriques fournies par Enedis sera traitée par un moteur de recherche créé par IFPEN, pour recenser et classer les zones à fort potentiel photovoltaïque, stockage stationnaire et bornes de charge, en intégrant les coûts des technologies, de l'électricité et des services réseau.

RESSOURCES ET USAGE DU SOUS-SOL POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE: UNE PERCÉE DU DIGITAL

En 2021, le Carnot IFPEN RE a concentré ses efforts sur la géothermie, la modélisation des stockages souterrains et l'hydrogène. En géothermie, les logiciels sont adaptés pour cerner le potentiel régional, mieux exploiter les ressources et optimiser la maintenance des installations, tout en maîtrisant l'impact environnemental. Les stockages font l'objet de simulations qui prennent en compte la géomécanique, les écoulements et les interactions fluides/roches. Enfin, des actions de recherche concernent la sécurité du transport et du stockage de l'hydrogène via des études sur les matériaux et leur corrosion, ainsi que sur les outils de surveillance environnementale.

FAIT MARQUANT


**TELLUS: les technologies du digital
au service des géosciences**

En mars 2021, le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques a lancé l'initiative TELLUS Share, communauté d'industriels du sous-sol animée par IFPEN autour du thème du digital. Il s'agit, au sein de cette communauté, d'évaluer ensemble l'apport des technologies numériques (science des données, intelligence artificielle, réalité virtuelle...) aux problématiques sous-sol. Pour cela, le Carnot IFPEN RE a mis en place un écosystème composé d'une équipe multidisciplinaire de géo-scientifiques et de spécialistes du numérique et de la science des données, et de partenariats privilégiés avec des acteurs du numérique (académiques, géants du numérique, start-up). Au lancement de l'initiative, quatre partenaires industriels issus du monde pétrolier et du domaine du stockage souterrain ont rejoint la communauté.

FAIT MARQUANT

**IFPEN partenaire de l'institut
de la corrosion**

L'institut de la corrosion et IFPEN ont signé en 2021 un accord-cadre de partenariat. Objectif : réaliser des études concernant les nouvelles technologies de l'énergie et la lutte contre la corrosion, qui impacte la sécurité des personnes, l'environnement et la rentabilité des procédés en s'attaquant aux installations liées au captage et transport de CO₂ ou d'hydrogène, à la géothermie ou à la transformation de la biomasse.



RÉDUIRE L'EMPREINTE CARBONE DU TRANSPORT TERRESTRE ET AÉRIEN



Autre exemple de travaux menés à IFPEN pour réduire l'empreinte carbone de l'aviation : le développement d'un procédé de conversion d'alcools en oléfines légères. La technologie Atol[®], développée par IFPEN, TotalEnergies et Axens, qui la commercialise, est en effet utilisée tant pour la chimie biosourcée que pour la production de biojet par la voie *Alcools To Jet* où elle est combinée à des étapes d'oligomérisation et d'hydrogénation qui font partie du portefeuille de technologies développées par IFPEN et commercialisées par Axens.

L'engagement d'IFPEN dans la transition énergétique, en phase avec les politiques publiques françaises et européennes se traduit notamment par le développement de technologies éco-efficaces pour la production de biocarburants avancés pour le transport routier et aérien. Les travaux, démarrés il y a de nombreuses années à l'échelle laboratoire, portent sur l'ensemble de la chaîne de procédés de conversion de la biomasse lignocellulosique (résidus agricoles et forestiers) en carburant, par les voies biotechnologiques (production de bioéthanol) et thermochimique (production de biogazole et biokérosène) à l'instar de la technologie BioTfuel[®].

Vers des carburants aéronautiques durables

Les tests sur les unités de démonstration qui ont été finalisés en 2021 confortent le positionnement de cette technologie comme une option de premier ordre pour la production de carburants aéronautiques durables (*sustainable aviation fuel – SAF*), permettant de réduire les émissions de GES de plus de 90 % par rapport à la référence fossile. Elle complète à ce titre les solutions dédiées à l'allègement des avions, à l'évolution des moteurs et à l'optimisation de la gestion du trafic proposées par l'industrie aéronautique.



Interview de **Jean-Philippe Héraud,** chef de projet BioTfuel[®]



Nous avons terminé avec succès le programme de tests sur les unités de démonstration BioTfuel[®] de Venette et de Dunkerque, avec nos partenaires du consortium. Cette phase de démonstration a permis de valider, de mettre au point et d'optimiser la chaîne de procédés à l'échelle semi-industrielle sur plusieurs types de biomasses, au terme de 1000 heures de gazéification et plus de 1500 heures de torréfaction. Nous avons ainsi franchi une étape cruciale dans le développement de la technologie pour la production de biokérosène à faible empreinte carbone. Les efforts, avec nos partenaires, vont à présent être orientés vers la recherche d'une 1^{re} référence industrielle du procédé qui est très bien adapté pour répondre aux objectifs réglementaires du secteur aérien, avec des cibles d'incorporation de SAF qui sont de 5 % en 2030 et plus de 50 % à l'horizon 2050**.* ➤➤

* IFPEN, Avril, Axens, CEA, Thyssenkrupp Industrial Solutions, TotalEnergies

** fixées par l'État français en 2020 et proposées par la Commission européenne en 2021 dans son paquet Fit for 55.



+ ENGAGÉS POUR UNE CHIMIE BIOSOURCÉE

IFPEN contribue à l'essor d'une économie verte conjuguant industrie et environnement, en développant de nouveaux procédés, catalyseurs et biocatalyseurs pour la transformation de résidus de biomasse en grands intermédiaires chimiques biosourcés.

Ces technologies répondent au besoin de réduction des émissions de GES de l'industrie tout en offrant une diversification des sources d'approvisionnement.

En outre, les travaux d'IFPEN contribuent à préparer la bioraffinerie du futur en renforçant les synergies entre production de biocarburants et production de bioproduits. Les travaux de développement d'un catalyseur et d'un procédé visant à produire de l'acide acrylique biosourcé à partir d'acide lactique se sont poursuivis, en collaboration avec Axens et un partenaire industriel. Des avancées significatives ont été obtenues avec une formulation catalytique présentant de très bonnes performances.

Dans le cadre du projet BioButterfly, les travaux menés sur les catalyseurs et le procédé associé ont conduit à des progrès notables en 2021, et la construction du démonstrateur préindustriel a été finalisée. Son exploitation prévue en 2022 permettra de valider le fonctionnement de la technologie de production de biobutadiène à partir d'éthanol biosourcé développée par Axens, IFPEN et Michelin, et qui constitue une des voies d'avenir pour un pneu 100 % durable.

+ FOCUS

En 2021, IFPEN a été choisi pour copiloter avec INRAE le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) sur les produits biosourcés et les carburants durables (voir page 6).

+ FAITS MARQUANTS

Production d'une polyoléfine à partir de déchets

Dans le cadre de son projet de déploiement de l'économie circulaire au Japon, la société Sumitomo Chemical a produit dans son laboratoire la première polyoléfine à partir de déchets.

Elle a utilisé pour cela de l'éthylène produit grâce à la technologie Atol®, fruit d'un partenariat entre IFPEN, TotalEnergies et Axens.

Ce procédé permet en effet de transformer l'éthanol produit à partir de déchets en éthylène de qualité polymère, qui est ensuite converti dans les installations de Sumitomo Chemical en polyoléfines, produit clé pour la fabrication de nombreux objets en plastique biosourcé.

Bouteilles en PET 100 % biosourcées : une première mondiale !

Fin 2021, la société japonaise Suntory a annoncé avoir produit avec succès les premiers prototypes de bouteilles en plastique PET 100 % biosourcées. Pour cela, elle a utilisé du bioparaxylène produit dans l'usine pilote TCat-B® de la société Anellotech (USA) grâce au procédé Bio-TCat® développé en partenariat avec IFPEN et Axens, qui permet de convertir la biomasse lignocellulosique en aromatiques. La technologie Bio-TCat®, prête à être commercialisée, permettra aux industriels de la chimie et aux marques d'atteindre leurs objectifs en matière d'environnement et de durabilité des produits, grâce à sa faible empreinte carbone et à sa matière première issue de biomasse renouvelable non alimentaire.

MOBILITÉ DURABLE



Pour répondre aux défis de l'efficacité énergétique des transports, améliorer la performance environnementale des motorisations et diversifier les sources d'énergie vers une mobilité propre et décarbonée, de plus en plus connectée, le Carnot IFPEN Transports Energie articule ses travaux en trois axes au service des entreprises, des collectivités et des citoyens : la mobilité électrifiée, la mobilité connectée et la mobilité à faible impact environnemental.



VERS UNE MOBILITÉ ÉLECTRIFIÉE ZÉRO ÉMISSION DE POLLUANTS

Dans le cadre de la décarbonation des transports, la mobilité individuelle se transforme pour devenir électrique avec la croissance des ventes de véhicules ZEV (zero emission vehicle) et l'avènement du rétrofit.

De plus, l'évolution des usages urbains vers des véhicules légers aux besoins en puissance réduits ouvre la voie vers des motorisations basse tension (< 60 V), plus simples et économiques. Le Carnot IFPEN Transports Energie contribue à cette transformation et promeut la mobilité zéro émission grâce au déploiement de technologies à faible consommation et haut rendement énergétique. En 2021, en collaborant au sein d'un écosystème français, il a notamment développé des technologies de motorisation électrique destinées au marché naissant du rétrofit.

2021 : l'essor de solutions performantes

La dynamique partenariale a également permis de développer une famille de motorisations électriques performantes, intégrant une électronique compacte et une technologie de refroidissement du moteur originale. Ces innovations se déclinent sur un large spectre d'applications, du petit véhicule basse tension aux véhicules demandant de fortes puissances. Pour alimenter ces partenariats et booster la compétitivité du tissu industriel, le Carnot IFPEN Transports Energie a conçu deux nouvelles topologies de machines qui ont fait l'objet de dépôts de brevet.

Ces dernières réduisent la consommation de matières premières de 30 % pour des prestations équivalentes à l'état de l'art, grâce à l'amélioration des densités de performances.

Enfin, l'année 2021 a vu l'aboutissement de deux projets : RefreeDrive et HERA.

Dans le cadre du projet européen RefreeDrive, le Carnot IFPEN Transports Energie a développé deux machines électriques sans terres rares (200 et 75 kW), et un onduleur avec des composants à base de carbure de silicium (SiC). L'onduleur a déjà fait l'objet d'une première valorisation. Le projet HERA, qui s'inscrit dans le cadre de la collaboration avec Punch Powertrain, a vu le développement d'un moteur électrique innovant et son contrôle répondant aux exigences industrielles pour une transmission électrique haute tension (350 V) et forte puissance (150 kW) d'un véhicule électrique.

FAIT MARQUANT



COMUTES² : en route vers la deuxième campagne d'essais

Fin 2020, à l'initiative du Carnot IFPEN Transports Energie, le Consortium pour la mutualisation de tests électriques sur systèmes de stockage (COMUTES²) lançait une première campagne de vieillissement accéléré, ouverte à tous, dédiée à l'impact des températures froides sur la durabilité des batteries Li-ion. Fort du succès de cette première campagne qui a fédéré cinq adhérents – Valeo, Siemens, Direction générale de l'armement (DGA), Hutchinson, EDF – autour des six laboratoires partenaires*, et se terminera en mars 2022, COMUTES² prépare une seconde campagne d'essais. En savoir plus sur COMUTES² : <https://www.comutes2.com>

* Les six laboratoires partenaires du consortium sont : le Carnot IFPEN TE, le CEA, l'université Gustave Eiffel, le laboratoire d'Intégration du matériau au système (IMS), l'Université de technologie de Compiègne (UTC) et l'EIGSI.

FAIT MARQUANT



Innover au sein d'un écosystème français

En 2021, le Carnot IFPEN Transports Energie et la PME française Erem ont mutualisé leurs moyens et compétences afin de développer et d'industrialiser des motorisations électriques innovantes pour une large gamme d'applications. IFPEN apporte à la PME son expertise consolidée par des brevets sur la conception du cœur électromagnétique du moteur électrique, ainsi que sur son pilotage. En collaboration avec Erem et Punch Powertrain France, IFPEN a ainsi développé et homologué un premier moteur haute tension pour des applications automobiles de rétrofit électrique, avec une application haut de gamme sur un véhicule de collection. En mutualisant l'outil de fabrication d'Erem, IFPEN a également conçu un moteur basse tension inédit en performances (48 V et 40 kW) destiné à de petits véhicules électriques. Ce moteur intègre un onduleur développé et industrialisé avec Punch Powertrain France, qui se différencie de l'état de l'art par sa densité de performances (20 kVA/kg et 20 kVA/l). Cette motorisation sera commercialisée en 2022.

MOBILITÉ CONNECTÉE
DES DONNÉES MULTI-ÉCHELLES/
MULTI-APPLICATIONS



IFPEN participe à la décarbonation de la mobilité du quotidien en développant, pour l'État, les territoires, le grand public et les professionnels de la route, des services et des applications connectés capables de mesurer l'empreinte environnementale des transports (CO₂, énergie et polluants) et ainsi d'encourager l'amélioration des comportements. Gecoair™, par exemple, est un outil d'aide à la réduction de l'empreinte environnementale des déplacements qui incite les utilisateurs à se déplacer de manière écoresponsable. Geovelo™ est quant à elle une application de La Compagnie des Mobilités, développée avec le Carnot IFPEN Transports Energie, permettant de favoriser l'usage du vélo. Depuis 2021, les données de mobilités, ainsi qu'un ensemble d'algorithmes et outils digitaux relatifs à la qualité de l'air et à la mobilité connectée, sont accessibles à partir d'une trentaine de web services mis à disposition des partenaires d'IFPEN via la plateforme mobicloud.ifpen.com développée par le Carnot IFPEN Transports Energie. L'année a d'ailleurs été également marquée par un élargissement du partenariat historique entre



Siemens PLM et IFPEN à travers, entre autres, l'usage et l'intégration plus forte du volet Real-Driving Emissions (situation de vie réelle sur route ouverte) dans le logiciel Simcenter Amesim. Ce dernier utilise désormais les services disponibles dans Mobicloud.

FAIT MARQUANT

Modéliser les données de mobilité en Île-de-France

En octobre 2021, le Carnot IFPEN Transports Energie et Paris Ouest La Défense (POLD) ont lancé leur nouveau partenariat collaboratif monté dans le cadre du projet Territoires d'innovation de grande ambition (TIGA) Île-de-France « Construire au futur, habiter au futur ». Ambition : capter, analyser et modéliser les données de mobilité sur le territoire de Paris Ouest La Défense afin de mieux comprendre et anticiper les déplacements liés au travail.

« L'ancrage d'IFPEN à Rueil-Malmaison et ses expertises en font un acteur incontournable de la recherche pour le territoire, explique Nathalie Jacquart, responsable développement économique et coordinatrice de projets de POLD. Notre collaboration, qui associe également l'université Paris-Nanterre, trouvera une application concrète via l'établissement d'une cartographie dynamique des flux vers et depuis la trentaine de tiers lieux du territoire.

Ces derniers sont des espaces propices pour développer de nouveaux modes de production, de création, de formation en lien avec des métiers d'avenir. Pour autant, ils sont peu connus, pas assez valorisés, ni interconnectés.

Mettre en perspective les flux de déplacement vers et depuis ces sites permettra de proposer des services et des horaires adaptés aux usagers, tout en facilitant les interconnexions entre les différents sites. » IFPEN construira ses analyses sur la base des données issues notamment de l'application d'écomobilité Gecoair™.



FAIT MARQUANT

Mobility Data Hub: vers une plateforme nationale des données de mobilité

Inscrire la mobilité dans une trajectoire ambitieuse de décarbonation tout en intégrant les évolutions des comportements impose de mieux connaître, d'analyser, voire de pouvoir prédire les déplacements des personnes et des biens. Les données de mobilité sont alors une ressource clé. Si les grands acteurs du numérique en détiennent une part significative, d'autres acteurs nationaux en possèdent des parts fragmentées fort pertinentes dès lors qu'une synergie peut être créée entre elles. Aussi, parce qu'il apparaît aujourd'hui nécessaire de créer un tiers de confiance fédérant ces acteurs et capable de traiter ces données, le Carnot IFPEN Transports Energie porte depuis fin 2021 avec Inria et Cerema l'élaboration d'un *Mobility Data Hub*, plateforme nationale des données de mobilité qui ambitionne de doter l'ensemble des acteurs d'outils communs permettant d'une part, de mutualiser les données de mobilité et d'autre part, d'analyser et d'anticiper la mobilité des personnes et des biens.

À noter: le *Mobility Data Hub* fait partie des lauréats du programme Propulse de l'Agence de l'innovation pour les transports, annoncés le 17 décembre 2021.

FAIT MARQUANT

Phoenix: vers un véhicule hybride rechargeable zéro émission

Le projet Phoenix (*PHev towards zero EmissionNs & ultimate ICE efficiency*), coordonné par IFPEN et mené avec sept acteurs industriels et académiques*, a démarré en 2021. Il a pour objectif de développer un démonstrateur de véhicule électrique hybride rechargeable avec un niveau de consommation de carburant et d'émission de polluants réduit. Le Carnot IFPEN Transports Energie interviendra principalement sur la conception des systèmes de combustion basé sur le concept Swumble™ et de post-traitement, la réalisation des moteurs prototypes et la calibration énergétique du moteur multicylindre. Phoenix contribuera à accélérer la transition vers une mobilité plus respectueuse de l'environnement en termes de qualité de l'air et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

* CRF/FCA (centre de recherche du groupe Fiat), FEV Europe, Johnson Matthey, Marelli Europe, Garrett Motion France, Politecnico di Torino et In Extenso Innovation Croissance. Ce projet bénéficie d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne H2020 au titre de la convention de subvention 101006841.

LA MUTATION DES MOTORISATIONS THERMIQUES

Dans un contexte où la transition vers les véhicules électrifiés s'accélère, les travaux du Carnot IFPEN Transports Energie dédiés aux motorisations essence visent à accompagner les industriels dans cette évolution.

Des innovations concernant le contrôle de la boucle d'air (système d'alimentation en air et recirculation des gaz brûlés) et/ou le système de combustion sont explorées notamment dans le cadre du projet européen Phoenix (*voir ci-contre*). Démarré en 2021, ce projet a pour objectif d'améliorer le rendement et les émissions d'un véhicule hybride rechargeable. Sur des TRL plus faibles, le programme européen EAGLE, qui s'est clôturé début 2021 (*voir le rapport d'activité 2020, page 24*) et d'autres études collaboratives ont permis de situer le potentiel en matière de rendement et d'émissions des motorisations essence. Dans le domaine des motorisations à gaz naturel ou biogaz, le développement de nouvelles motorisations à allumage commandé a commencé et devrait se poursuivre par la caractérisation expérimentale d'un nouveau système de combustion avec des gains en rendement de l'ordre de 10 %. La transition énergétique du secteur fluvial est également soutenue par le Carnot IFPEN Transports Energie. Avec Voies navigables de France (VNF), un marché de recherche et développement vise à définir le schéma directeur de verdissement de la flotte fluviale sur le bassin Rhône-Saône (*voir page 24*). Dans le cadre d'un partenariat R&I, un second projet étudie les systèmes de récupération de la chaleur fatale des moteurs des bateaux et leur potentiel pour la navigation.



FOCUS

En 2021, IFPEN a été choisi pour copiloter avec l'université Gustave Eiffel le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) sur la digitalisation et la décarbonation des mobilités (*voir page 6*).



+
FOCUS



**Interview de
Cécile Cohas,
responsable de la
mission recherche
innovation, Voies
navigables de
France (VNF)**



Afin de répondre à notre objectif de verdissement des bateaux fluviaux, nous avons demandé à IFPEN de nous accompagner. Cela se traduit par un marché de recherche et développement qui vise à élaborer des scénarios prospectifs de verdissement du bassin Rhône-Saône d'ici à 2050. L'étude réalisée par les équipes d'IFPEN aborde le sujet d'une manière transversale très approfondie. Outre les modélisations techniques, technologiques et économiques des solutions que nous envisageons, elle offre des analyses des cycles de vie essentielles pour compléter les données sectorielles issues de la Commission européenne. À terme, l'objectif est que ces scénarios s'élargissent à l'ensemble des bassins de VNF et se traduisent par la construction de bateaux neufs ou de retrofit de bateaux. Pour la mise en œuvre et le déploiement de cette réalité sur le terrain, nous aurons encore besoin des équipes d'IFPEN. Je souhaiterais que l'on s'inscrive avec IFPEN dans un partenariat pérenne, à la fois scientifique et technique, qui nous permette de nous appuyer sur un établissement référent pour nos activités. »



Le Carnot IFPEN Transports Energie travaille sur des solutions permettant d'utiliser l'hydrogène renouvelable ou bas carbone afin de réduire l'impact environnemental de la mobilité :

- hydrogène alimentant une pile à combustible générant de l'électricité embarquée pour les véhicules électriques ;
- hydrogène utilisé comme carburant dans un moteur à combustion interne ;
- intégration d'hydrogène décarboné dans la production de biocarburants avancés, sous forme d'e-biofuels utilisables par les transports lourds (terrestre ou maritime), l'*off-road* et le secteur aérien.

Depuis octobre 2021, les chercheurs du Carnot IFPEN Transports Energie participent au projet ECH2 porté par la société Vitesco Technologies. Objectif : améliorer l'électronique de contrôle des véhicules à pile à combustible hydrogène et faciliter leur déploiement à grande échelle en réduisant leur coût et en augmentant leur durée de vie.

Par ailleurs, un nouveau banc d'essai de systèmes piles à combustible d'une puissance de 210 kW (le plus puissant de France) a été mis en service sur le site d'IFPEN-Lyon.

HYDROCARBURES RESPONSABLES

Face à la nécessité de gagner en efficacité énergétique, de réduire les émissions de CO₂ et les nuisances de l'industrie et des transports, tout en répondant à la demande mondiale en mobilité, en énergie et en produits pour la chimie, IFPEN œuvre pour produire des carburants et des intermédiaires chimiques dans le respect des normes actuelles. Dans le même temps, il met au point des technologies permettant de réduire les risques liés à l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures.



RÉCUPÉRATION AMÉLIORÉE: UN IMPACT ENVIRONNEMENTAL RÉDUIT

La récupération améliorée des hydrocarbures (EOR: *Enhanced Oil Recovery*)

permet de répondre à la demande en augmentant la production des réservoirs existants, en limitant les forages et en optimisant la gestion des eaux de production.

Dans ce domaine, IFPEN, Beicip-Franlab et Solvay développent, au sein de l'Alliance EOR, des technologies adaptées à différents types de réservoir et de procédés EOR, depuis la recherche de formulations en laboratoire jusqu'à l'expérimentation sur champ. Le JIP DOLPHIN 3, démarré fin 2019 avec six opérateurs pétroliers et axé sur la limitation de l'impact environnemental de l'EOR, poursuit ses activités avec la réalisation de tests de l'unité de traitement des eaux sur la plateforme IFPEN GOwSP (*Gas Oil water Separation Platform*).



COMPRENDRE ET MODÉLISER LE SOUS-SOL

Dans le contexte actuel de la transition énergétique, les industriels s'efforcent de minimiser les risques et les impacts environnementaux, en mettant en œuvre des moyens efficaces pour explorer, caractériser et produire les ressources du sous-sol.

À l'échelle du bassin, le Carnot IFPEN RE renforce la capacité explicative et prédictive de la modélisation pour comprendre l'évolution dynamique du sous-sol sur les temps géologiques et gérer les incertitudes, dans le but d'identifier les opportunités de forage, d'estimer le potentiel en hydrocarbures, de localiser les gisements et de diminuer le risque en exploration. À l'échelle du réservoir, les efforts portent sur la modélisation des phénomènes complexes afin de caractériser et mieux maîtriser la production.



FAIT MARQUANT

IFPEN organise un *workshop* international sur la modélisation de bassin

La deuxième édition du *workshop* « *Basin Modeling* » organisé par le Carnot IFPEN

RE a réuni plus d'une centaine d'experts d'une vingtaine de pays et a permis de faire un état des lieux des différents axes de recherche de la discipline. Une attention particulière a été accordée à la mise en œuvre de nouvelles méthodologies de travail, aux thématiques de la perméabilité et des écoulements dans les failles et fractures, ainsi qu'à des problématiques multi-physiques et multi-échelles. Une session spécifique était dédiée à la transition énergétique.



PRODUCTION OFFSHORE : LA MAÎTRISE DU FOND DES MERS

L'offshore, qui représente un tiers de la production d'hydrocarbures, a connu une baisse d'activité en 2021.

Néanmoins, l'industrie y rencontre des problèmes qui demeurent critiques, comme les fortes sollicitations mécaniques en profondeur, la corrosion due aux fluides extraits, la survenue de bouchons d'hydrates ou de paraffines, le mélange de fluides en composition variable à pomper et parfois à séparer en fond de mer, ou encore le coût des installations.

Face à ces défis, le Carnot IFPEN RE a poursuivi ses recherches sur la conception d'équipements de forage en mer, de canalisations flexibles, de pompes polyphasiques et de capteurs limitant les risques de production.

PRODUCTION DE CARBURANTS PROPRES

Dans un contexte de transition énergétique qui s'accélère, le secteur du raffinage doit faire face à un durcissement des réglementations liées aux carburants, ainsi qu'à sa nécessaire adaptation à l'évolution du marché à travers la valorisation des produits transformés vers la chimie.

Dans le domaine des carburants propres, IFPEN développe des catalyseurs et des procédés permettant de répondre aux spécifications les plus sévères et de réduire l'impact environnemental des transformations associées à leur production. En 2021, les recherches ont notamment concerné l'hydrotraitement des essences de FCC, le reformage catalytique ou encore l'hydrocraquage et l'hydro-déparaffinage de coupes gazoles avec, par exemple, le développement d'un catalyseur qui permet d'augmenter leur tenue au froid et d'améliorer la qualité du carburant tout en conservant le rendement.



FAIT MARQUANT

Partenariat avec OneSubsea : tests sur une pompe polyphasique

Dans le cadre d'un contrat de collaboration avec OneSubsea, des tests ont été réalisés sur une pompe polyphasique permettant la remontée du mélange de fluides de production sans séparation préalable des différentes phases. Un prototype transparent voué à la recherche sur les écoulements polyphasiques dans les pompes a été installé sur le site de Lyon. À la suite d'une première campagne d'essais réussie, cet équipement restera sur place, à IFPEN-Lyon, afin de pouvoir poursuivre les tests et les recherches sur le sujet.

FAIT MARQUANT

Reformage catalytique : une nouvelle série de catalyseurs optimisés

La gamme de catalyseurs de reformage catalytique Symphony®, commercialisée par Axens, s'étoffe d'une nouvelle série pour le mode semi-régénératif. Le reformage catalytique est une étape essentielle pour transformer les coupes légères issues de bruts pétroliers en bases carburants et pour produire de l'hydrogène.

Ces catalyseurs, issus des travaux de recherche d'IFPEN, offrent une activité et une stabilité accrues tout en améliorant les rendements en reformat et en hydrogène, contribuant ainsi à l'amélioration des performances économiques et énergétiques du procédé.

Les procédés éco-efficents pour la production de carburants développés par IFPEN visent à contribuer à l'objectif de décarbonation de l'industrie, tout en offrant de la flexibilité afin de favoriser la diversification des activités du raffinage et la synergie avec la pétrochimie. Confrontée à des mutations majeures, la raffinerie du futur, véritable hub énergétique, devra en effet disposer de technologies permettant de traiter de multiples charges (dont celles issues de la biomasse et du recyclage des plastiques) et de produire à la fois des produits chimiques, du carburant, de l'hydrogène, etc.

FAIT MARQUANT

Nouveaux catalyseurs d'hydrotraitement des essences de FCC

Les recherches d'IFPEN ont permis de mettre au point deux nouveaux catalyseurs, d'hydrogénation sélective et d'hydrodésulfuration sélective, pour le procédé Prime-G+® commercialisé par Axens. Ces développements complètent ainsi une offre adaptée aux besoins des acteurs du raffinage pour la production d'essence répondant aux normes environnementales les plus strictes, comme en atteste la 300^e référence obtenue par la technologie Prime G+® en 2021.

FAIT MARQUANT



Data et procédés

IFPEN intensifie ses actions dans le domaine du traitement et de la capitalisation des données issues de l'expérimentation haut débit et de celles liées au développement de procédés technologiquement complexes.

Ces actions visent d'une part à développer des outils de valorisation des données de la recherche, facilitant le travail des équipes de R&I et contribuant à améliorer l'efficacité de l'expérimentation ; d'autre part, à proposer de nouveaux services et technologies numériques pour accélérer la transition digitale de l'industrie du raffinage et de la pétrochimie.

FAIT MARQUANT

Procédé d'hydrocraquage en deux étapes pour la production de naphthas

Les chercheurs d'IFPEN ont finalisé un procédé haute pression en deux étapes, destiné à la conversion sélective de coupes lourdes en coupes naphtha, aptes à être introduites dans un vapocraqueur pour produire des oléfines légères. Associé à un catalyseur zéolithique innovant développé en 2020, il contribue au développement de complexes *Oil To Chemical*.

CONVERSION ET PURIFICATION DES BRUTS LOURDS ET DES RÉSIDUS



L'augmentation des pétroles lourds et extra-lourds dans l'approvisionnement pétrolier mondial et la demande forte pour des produits légers rendent la conversion des fractions lourdes incontournable.

IFPEN développe des technologies pour convertir et purifier ces charges vers des produits plus propres, répondant à des spécifications de plus en plus sévères. Les solutions mises au point contribuent à la réduction des rejets de CO₂ liés à cette conversion, tout en permettant aux raffineries de gagner en efficacité énergétique.

En 2021, les travaux dans le domaine de l'hydroconversion profonde des résidus lourds par hydrocraquage en lit bouillonnant ont abouti à des résultats importants démontrant la convertibilité des charges plus difficiles. Les recherches ont également visé à améliorer les procédés de conversion et de désulfuration profonde pour la production de fuels de soute respectant les normes IMO 2020. Le segment de la conversion est aussi porté par les complexes *Oil To Chemical* destinés à transformer du brut en un maximum de produits chimiques.

Parmi les travaux réalisés dans ce domaine, citons le développement d'un procédé d'hydrocraquage en deux étapes pour la production de naphthas, ainsi que ceux menés dans le cadre de l'Alliance FCC, qui réunissait IFPEN, Axens, TotalEnergies et Technip Energies. L'objectif de ces derniers : augmenter la flexibilité du procédé de craquage catalytique en lit fluidisé en termes de charges et de produits ciblés.

PRODUCTION D'INTERMÉDIAIRES PÉTROCHIMIQUES

La croissance du secteur de la pétrochimie reste soutenue, reflétant la hausse de la demande en biens de consommation au niveau mondial. Les composés chimiques de base tels que les oléfines et les aromatiques servent en effet à fabriquer des produits utilisés dans l'industrie des plastiques, la pharmaceutique, la cosmétique, l'électronique, l'automobile, l'aéronautique, le textile, ou encore en agriculture.

Afin de satisfaire la demande du marché dans le respect de la réglementation visant à réduire l'impact environnemental des procédés industriels, IFPEN développe des technologies éco-efficaces de production d'intermédiaires pétrochimiques et optimise les performances des procédés existants.

Les travaux menés en 2021 dans le domaine des aromatiques, notamment dans le cadre des recherches dédiées à l'amélioration de la technologie Eluxyl® commercialisée par Axens, ont abouti au développement de nouveaux tamis de séparation de xylène encore plus performants.

Dans le domaine des oléfines, les travaux ont porté sur le développement de technologies d'hydrogénation sélective, de production de propylène, ou encore de production de butène-1 avec la mise au point d'un nouveau procédé commercialisé par Axens. Ce procédé contribue également à favoriser l'utilisation de nouvelles matières premières, comme celles issues de la biomasse, illustrant la transformation profonde du secteur de la pétrochimie.



UNE OFFRE INTÉGRÉE POUR LE TRAITEMENT ET LA CONVERSION DU GAZ



Le développement de technologies de traitement du gaz reste favorisé par l'augmentation de sa consommation, avec une prévision de contribution au mix énergétique à hauteur de 25 % d'ici 2040. Les travaux menés au sein d'IFPEN visent à proposer à l'industrie une gamme complète de technologies pour désacidifier le gaz naturel ou capter le CO₂ dans les procédés de production de gaz de synthèse et réduire efficacement et économiquement les émissions de CO₂ à la source. Les équipes de R&I travaillent à rendre toujours plus performantes et compétitives ces solutions qui vont du design de procédés à la mise au point de solvants, en passant par le développement de garnissages pour les colonnes d'absorption.

FAIT MARQUANT

DimEne-B® : un nouveau procédé de production de butène-1

Les équipes d'IFPEN ont développé un nouveau procédé – et le catalyseur associé – de catalyse homogène pour la production de butène-1 par dimérisation de l'éthylène.

Le butène-1 est un intermédiaire de base de la chimie employé notamment comme comonomère pour la fabrication de plastiques. Le procédé, commercialisé par Axens, permet également de transformer de l'éthylène issu de biomasse et, ainsi, de contribuer à la production de bioplastiques. Plus économe en énergie, il bénéficie en particulier d'un design permettant d'augmenter la capacité de production de butène-1.

UNE RECHERCHE FONDAMENTALE AU SERVICE DE L'INNOVATION

Afin de garantir la qualité scientifique de ses travaux de recherche et de soutenir ses ambitions d'innovation, IFPEN s'appuie sur un programme de recherche fondamentale collaboratif et structuré autour de neuf verrous scientifiques. Cette approche, vivante et dynamique, a désormais prouvé son efficacité. Pour anticiper les besoins d'innovation à long terme et pour préparer le développement de nouveaux produits et procédés, IFPEN oriente en permanence ses questionnements scientifiques de façon à acquérir de nouvelles connaissances.



UNE RECHERCHE FONDAMENTALE STRUCTURÉE

Depuis 2016, les verrous scientifiques jalonnent l'ensemble du cheminement de la R&I d'IFPEN, de la compréhension des mécanismes à l'échelle atomique jusqu'à l'évaluation de l'impact économique et environnemental des procédés et produits. Ils conduisent à formaliser des questionnements scientifiques auxquels il faut répondre pour préparer les activités de recherche plus appliquée. Ces verrous sont eux-mêmes organisés en défis, correspondant à des obstacles plus précis à surmonter. Projets, thèses, post-doctorats et partenariats, IFPEN mobilise de multiples ressources au service de leur résolution. Pleinement opérationnelle, cette structuration par verrous consolide une méthodologie de recherche qui accorde une large place à l'ouverture, la collaboration et le partage des connaissances.



DES NTE AU CŒUR DES VERROUS

IFPEN a poursuivi ses efforts en 2021 à la fois pour favoriser la transversalité entre les verrous sur les thématiques des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) et opérer le déploiement de la nouvelle priorité stratégique Climat, environnement et économie Circulaire au sein du programme de recherche fondamentale. Ainsi, le nombre de thèses en lien avec cette priorité stratégique est passé de un à sept sur l'année. Les enjeux scientifiques du recyclage des plastiques ont fait l'objet de nouveaux défis répartis au sein de trois verrous, tandis que ceux de la thématique « interactions climat/sol et cycle de l'eau » ont donné lieu à de nouveaux projets.

Parmi ceux-ci, le projet international Vulcar-Fate, dont l'objectif est d'évaluer l'impact des changements climatiques récents et des usages des sols sur le bilan hydrique et le transport de sédiments et de matière organique, ainsi que sur la dégradation des sols pouvant entraîner l'émission de carbone dans l'atmosphère (voir page 15).

Lancé en juin 2021, il a été sélectionné dans le cadre de l'appel à projets du Belmont-Forum visant la durabilité des sols et des eaux souterraines pour la société. La visite scientifique de David Sebag, spécialiste international en géologie environnementale, a par ailleurs permis de renforcer la capacité d'IFPEN à caractériser la matière organique des sols pour une meilleure description des formes de stockage du carbone.

Une base partenariale qui se consolide et s'enrichit

Cette stratégie d'ouverture se manifeste par le développement de partenariats, anciens comme nouveaux, à l'image de l'accord-cadre pour la recherche scientifique signé avec *University College London* (UCL) en 2021. Le CEA et IFPEN ont renouvelé leur accord en cours depuis 2007 pour continuer de faire évoluer la plateforme de développement et de services « Arcane » dans le domaine du calcul haute performance, et préparer sa mise en *open source*. Les deux partenaires ont également décidé de coporter, à partir de janvier 2022, *STET* (*Science and Technology for Energy Transition*), évolution d'*OGST* (*Oil & Gas Science and Technology*), revue scientifique internationale en *open access* dont le positionnement est désormais tourné vers la transition énergétique. La mise en commun des compétences d'IFPEN et de ses cinq partenaires* au sein du laboratoire commun de recherche (LCR) Carmen continue pour sa part de produire des résultats significatifs deux ans après son lancement. Enfin, la mutualisation de la recherche fondamentale avec des acteurs privés, que ce soit dans le cadre d'accords bilatéraux (EDF, Safran, Saint-Gobain, TotalEnergies, etc.), de consortiums ou de *Joint Industry Projects* (JIPs Fugacity et EleTher), continue d'enrichir les travaux menés pour résoudre différents défis scientifiques.

* CNRS, ENS de Lyon, Sorbonne Université, université Claude Bernard Lyon 1 et université de Strasbourg

FAIT MARQUANT

BIFROST, un projet collaboratif interdisciplinaire

À l'interface de la chimie analytique et de la science des données pour l'analyse de mélanges complexes, le projet BIFROST (*Blind Identification, Filtering & Restoration On Spectral Techniques*), mené depuis 2018 avec les instituts marseillais de mathématiques (I2M) et des sciences moléculaires (ISM2) dans le cadre de l'initiative d'excellence d'Aix-Marseille, s'est achevé en 2021. Alliant analyse quantitative et optimisation algorithmique en démixage de signaux (séparation de sources), il a mis en évidence l'intérêt de conjuguer de nouvelles méthodes d'acquisition de données RMN (résonance magnétique nucléaire) et de mathématiques appliquées.



Interview de
Sophie Violette,
Maître de conférences
– HDR, Sorbonne
Université – Laboratoire
de géologie de l'ENS-PSL
Université et membre
du Conseil scientifique
d'IFPEN

C'est un virage à 180° des hydrocarbures vers des nouvelles thématiques énergétiques et écologiques qu'a réussi à engager IFPEN ces dernières années. La démarche de structuration de la recherche fondamentale en verrous a été un atout essentiel à la réflexion menée dans le cadre de cette mutation, car elle a permis de prendre du recul sur la finalité des technologies d'IFPEN et leurs applications. Il faut ainsi saluer en particulier le profond renouveau de la direction Science de la terre et technologies de l'environnement qui a su asseoir le transfert de ses compétences vers les NTE, et les équipes de recherche d'IFPEN qui l'ont concrétisé grâce à leur grande capacité d'adaptation.

La thématique « interaction climat/sol et cycle de l'eau » est exemplaire de ce point de vue : son projet phare « Enjeux de la zone critique » a non seulement exigé une remontée des compétences acquises sur les bassins profonds vers les thématiques de la surface, mais a aussi démontré l'efficacité de la transposition des outils analytiques historiques d'IFPEN. C'est le cas de Rock-Eval®, capable de caractériser de façon fiable, rapide et peu coûteuse le contenu de la matière organique dans les sols, ainsi que d'autres outils numériques qui pourront à terme quantifier l'impact anthropique sur les processus d'érosion. Le développement de ces thématiques à IFPEN a en outre été l'occasion de nouer des partenariats académiques et industriels. Une nouvelle collaboration avec INRAE, partenaire de longue date, a ainsi donné lieu à une mise en commun de compétences particulièrement fructueuses et qui pourrait ouvrir sur d'autres collaborations à l'avenir. Soulignons enfin l'apport de la visite scientifique de David Sebag, dont l'expertise complémentaire dans les sciences du sol est venue renforcer et dynamiser les compétences des équipes d'IFPEN. »



**Interview de
Jean Kittel,
ingénieur physico-chimiste
à IFPEN**

En 2021, IFPEN a encore renforcé sa présence dans le domaine de la corrosion.

Associés depuis 2015 sur la base d'un savoir-faire et de laboratoires expérimentaux complémentaires, et forts des connaissances engrangées lors de travaux communs tels que ceux menés entre 2019 et 2021 dans le cadre du Joint Industry Projects (JIP) de recherche fondamentale Fugacity sur la pénétration de l'hydrogène dans les aciers, IFPEN, au travers de son institut Carnot IFPEN Ressources Energétiques, et l'institut de la corrosion ont signé un accord-cadre de partenariat pour cinq ans. L'objectif ? Développer de nouvelles collaborations en recherche et innovation pour des débouchés applicatifs au service d'une industrie durable, respectueuse de l'environnement et de la sécurité des personnes. Les avancées devraient ainsi alimenter l'innovation dans de nombreux domaines des nouvelles technologies de l'énergie (géothermie, hydrogène, éolien, ou encore captage, stockage et valorisation du CO₂), ainsi que pour l'exploration et la production responsables d'hydrocarbures.

Le partenariat a d'ores et déjà donné lieu au lancement d'un groupe d'étude (Membership Research Consortium) afin d'analyser le comportement des matériaux en présence d'hydrogène. »

FAIT MARQUANT

Thermodynamique : quand IFPEN anticipe les besoins croissants dans le domaine du recyclage

Les objectifs de la loi sur l'économie circulaire et les besoins exprimés par les industriels ont fait de la thermodynamique appliquée au recyclage un domaine actif de recherche pour lequel les contributions d'IFPEN ont été significatives. Parmi les différentes actions en cours, la chaire d'enseignement et de recherche EleTher, lancée par IFP School en 2021, s'intéresse à l'utilisation des outils thermodynamiques pour améliorer l'efficacité des procédés de recyclage et vise, pour cela, à mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques en phase aqueuse. « La chaire s'appuie sur les travaux de recherche du JIP EleTher qui, menés avec sept partenaires industriels, ont porté sur les systèmes contenant des espèces ioniques et leurs nombreuses applications : le recyclage des métaux, le traitement de la biomasse ou encore le captage et stockage du CO₂. Deux ans après son lancement en 2019, les résultats du JIP en matière d'analyse de données et d'étalonnage de modèles ont déjà donné lieu à une publication, plusieurs rapports et des webinaires à destination des experts industriels, et devraient conduire à son renouvellement en 2022 », précise Jean-Charles de Hemptinne, titulaire de la chaire et enseignant-chercheur à IFP School. Dans ce contexte, la tenue de la 31^e édition de la conférence ESAT sur la thermodynamique appliquée, organisée conjointement avec Mines ParisTech en juillet 2021, a permis la réunion des acteurs de la discipline. « Une communauté d'échange est nécessaire au dialogue autour des dernières avancées et des travaux les plus récents », ajoute encore l'enseignant-chercheur. Au format 100 % virtuel, cette rencontre a réuni près de 300 participants issus de 37 pays. Le format a été très apprécié pour la possibilité d'interagir en temps de Covid-19, tout en assurant une grande qualité scientifique, avec plusieurs remises de prix et une table ronde consacrée à la thématique de la chaire.



+
FAIT MARQUANT

Systèmes complexes: multiplier les collaborations pour de nouvelles méthodes d'optimisation

En 2021, IFPEN a poursuivi le renforcement de son expertise dans le domaine de la commande et de l'optimisation des systèmes complexes impliqués dans nombre de ses produits et procédés. Sa stratégie d'ouverture et de mutualisation des connaissances, via des collaborations de recherche avec des partenaires universitaires, industriels et des organismes de recherche, continue de porter ses fruits. À la chaire en mathématiques appliquées Oquaido, pilotée par l'école des Mines de Saint-Étienne et qui rassemblait 11 partenaires, dont IFPEN, a ainsi succédé *Ciroquo (Consortium Industrie et Recherche pour l'Optimisation et la QUantification d'incertitude pour les données Onéreuses)*. Porté par l'École centrale de Lyon et coanimé par IFPEN, ce nouveau consortium réunit six partenaires académiques et sept partenaires de recherche technologique, et vise à répondre aux enjeux de l'exploitation des simulations coûteuses issues de grands codes de calcul. IFPEN mène également des travaux au sein du projet ANR SAMOURAI (*Simulation Analytics and Meta-model-based solutions for Optimization, Uncertainty and Reliability Analysis*) lancé en 2021 pour quatre ans. Là encore, avec six partenaires académiques et industriels, IFPEN développe des méthodes innovantes d'optimisation, basées sur des méta-modèles, pour la conception et l'évaluation des risques propres aux systèmes complexes dans différents domaines : énergies renouvelables et décarbonées et transport aérien à faible émission de CO₂. Ces méthodologies enrichiront notamment LAGUN, une plateforme *web open source* d'exploration de données et d'optimisation codéveloppée avec Safran Tech.

ILS ONT ÉTÉ RÉCOMPENSÉS EN 2021...



Antoine Fécant, ingénieur de recherche à IFPEN, a reçu le prix Espoir IMT – Académie des sciences 2021 pour l'ensemble de ses travaux, et notamment sa contribution à la naissance des travaux de recherche dans le domaine de la photocatalyse, poursuivis au sein d'IFPEN pour la production d'hydrogène décarboné et la valorisation du CO₂ sous la forme de « carburants solaires ».



Rémi Hocq, doctorant IFPEN (2017-2019), a reçu la médaille d'argent Dufrenoy décernée par l'Académie d'agriculture de France pour ses travaux sur le « *Clostridium beijerinckii* DSM 6423, une souche plateforme émergente pour la bioproduction de solvants ».



Julie Guillemant, doctorante IFPEN (2017-2019), a reçu le prix 2021 de la Société française de spectrométrie de masse (SFSM) pour ses travaux sur « l'exploitation chimiométrique des données d'analyse moléculaire (FT-ICR/MS) des gazoles (GO) et des gazoles sous vide (VGO) pour la recherche de descripteurs de réactivité ».



ET AUSSI...

L'excellence scientifique des travaux de **Lina Jolivet** a été distinguée par le prix Yves Chauvin 2021, décerné par le Conseil scientifique d'IFPEN pour sa thèse intitulée « Apport de la spectroscopie de plasma induit par laser pour la modélisation des procédés de raffinage ». Ses travaux se poursuivent dans le cadre d'un projet de recherche commun avec la start-up Ablatom sur l'adaptation de l'utilisation de cette technique aux matériaux pour les NTE.

+
FOCUS

Neuf projets ont été retenus parmi les 33 propositions impliquant IFPEN qui ont été déposés en réponse à l'appel à projets générique 2021 de l'ANR. Ce nombre en nette augmentation par rapport aux années précédentes illustre la qualité et la pertinence des propositions élaborées. Ces projets contribueront à lever des verrous scientifiques dans des domaines aussi variés que la géothermie, l'intelligence artificielle, la transformation de la biomasse ou encore les machines électriques.

ENCOURAGER ET SOUTENIR L'INNOVATION

IFPEN contribue au développement des filières industrielles vertes et de la mobilité durable en accélérant la détection d'opportunités dans les NTE. Pour ce faire, IFPEN est engagé dans une large diversification de ses partenariats industriels et du développement de ses filiales et soutient la compétitivité des PME et start-up innovantes, contribuant ainsi à favoriser la création d'emplois et de richesse dans les territoires. En appui, IFPEN encourage en interne l'expression d'une véritable culture de l'innovation.



L'INNOVATION OBJET DE CHALLENGES INTERNES

La stratégie de diversification dans les NTE au service de l'innovation se traduit dans le fonctionnement d'IFPEN. Ainsi, un challenge destiné aux salariés, aux étudiants d'IFP School et aux collaborateurs des filiales du groupe IFPEN est régulièrement organisé afin de stimuler la culture d'innovation de l'entreprise. L'année 2021 aura permis de faire avancer les cinq projets lauréats du challenge 2020 : expérimentations et POC ont ainsi conduit, pour plusieurs d'entre eux, à un partenariat avec une PME ou un groupe industriel, ou à un dépôt de brevets. En complément, une démarche dite de « créativité blanche » est centrée sur le développement de nouvelles compétences, méthodologies et outils expérimentaux ou numériques. Par ailleurs, à travers un dispositif d'essaimage, IFPEN accompagne ses salariés souhaitant créer des entreprises. En 2021, IFPEN a ainsi soutenu la création par un salarié de la société TechKare™ qui propose des solutions d'aide au déplacement de charges lourdes en milieu hospitalier (voir page 7 et le rapport d'activité 2020, page 33).



ACCOMPAGNEMENT DES START-UP ET DES PME : UNE ANNÉE REMARQUABLE

IFPEN conduit depuis près de 30 ans une politique active de soutien aux PME et start-up qui portent des projets d'innovation ayant un impact positif sur l'environnement.

En 2021, le développement des moyens de prospection digitale a contribué à faire connaître plus largement l'offre d'accompagnement d'IFPEN, ce qui a permis de voir le nombre de contrats de partenariat signés avec de jeunes entreprises plus que doubler par rapport aux années précédentes.

Les entreprises ayant intégré l'écosystème IFPEN en 2021 proposent des innovations aussi variées que la production d'additifs biosourcés pour l'industrie papetière (voir page 34), des algorithmes IA destinés au traitement d'images, un système permettant la préparation de gaz étalons, l'entraînement des corvidés au ramassage des déchets, la production d'eau de boisson à partir de panneaux solaires, des *serious games* pour la transition énergétique ou encore une technique d'imagerie innovante pour les mesures d'écoulement.

IFPEN, partenaire des événements majeurs de la sphère *deeptech*

Illustration de cette montée en puissance, IFPEN a signé une convention partenariale avec Bpifrance, afin de soutenir la création et le développement de start-up technologiques (voir ci-contre). IFPEN est également partenaire du challenge *Hello Tomorrow*, organisé dans le cadre du *Hello Tomorrow Global Summit*, et parraine la catégorie « Énergie et Environnement » de cette compétition, qui a pour objectif de dénicher les projets technologiques et scientifiques les plus prometteurs répondant aux enjeux sociétaux, environnementaux et industriels de demain. Cette année, la start-up suisse Oxyle, qui développe une solution pour éliminer les polluants organiques hautement persistants des eaux usées municipales et industrielles, a été primée.

FAIT MARQUANT

Accompagnement de FunCell, qui développe des additifs biosourcés pour l'industrie papetière

Depuis 2021, IFPEN accompagne FunCell, jeune pousse prometteuse fondée en 2020 et située en Isère, qui développe des additifs biosourcés pour l'industrie papetière. Ces additifs améliorent les propriétés des matériaux cellulosiques (papiers, cartons, emballages et hygiène) et leur confèrent notamment une meilleure résistance à l'humidité. Une innovation qui pourrait favoriser l'usage des emballages papier comme alternative aux plastiques. Les additifs ayant été produits avec succès en laboratoire, IFPEN va aider FunCell à structurer une démarche d'extrapolation du procédé à l'échelle du pilote industriel. « Nous sommes heureux de pouvoir nous associer à IFPEN et de bénéficier de toute son expertise pour aller plus loin et permettre l'industrialisation de notre technologie qui offre des perspectives intéressantes sur le marché des emballages écoresponsables », précise Gilles du Sordet, président de FunCell. Grand prix au concours i-Lab 2020, la solution FunCell répond en outre aux critères de durabilité et de toxicité du marché des emballages.



FAIT MARQUANT



IFPEN et Bpifrance s'allient pour soutenir les start-up issues de la *Greentech*.

À l'occasion de l'édition 2021 du *Meet'Up Greentech*, le rendez-vous annuel de l'écosystème français de la *Greentech* organisé par le ministère de la Transition écologique, Pascale Ribon, directrice DeepTech de Bpifrance, Catherine Rivière, directrice générale adjointe d'IFPEN, et Nathalie Alazard-Toux, présidente d'IFP Investissement, ont signé une convention partenariale. Via cet accord de coopération, Bpifrance et IFPEN vont mobiliser leurs moyens et leurs compétences pour favoriser le transfert des résultats de la recherche par la création de start-up dans quatre domaines clés de la transition écologique : la mobilité durable, l'économie circulaire, l'efficacité énergétique et la qualité de l'air. Bpifrance et IFPEN souhaitent faire converger leurs objectifs respectifs, en cohérence avec les axes stratégiques formalisés dans le Plan *DeepTech* élaboré par les pouvoirs publics : valorisation des résultats de la recherche publique et soutien aux start-up mobilisant des technologies de rupture.

À noter : IFPEN est membre depuis l'origine du réseau national des incubateurs *Greentech*, lancé en 2017 par le ministère de la Transition écologique.



Interview de
Guillaume Lepage,
responsable du développement
technologique, Naturamole



Nous avons rencontré IFPEN lors d'un événement dédié à l'écosystème R&D français. Parmi les différentes offres d'accompagnement de PME existantes, le partenariat Boost & Link™ qu'offre IFPEN nous a paru très intéressant à plusieurs titres. En premier lieu sur un plan technique, du fait de son expertise avancée dans le domaine des procédés de séparation et des technologies de distillation, IFPEN a su nous aider à développer un procédé de purification haut rendement et haut degré de pureté à partir d'un principe actif issu de ressources renouvelables. La structuration du service est également un point fort : l'offre proposée est simple, explicite, et les étapes sont clairement définies. Enfin, le modèle de revenu au succès est un atout indéniable : en tant que PME, nous n'avons pas d'avance de trésorerie à faire. Forts de cette réussite, nous envisageons de faire à nouveau appel à IFPEN pour de futurs projets de développement. »

+ **FOCUS**

En 2021, IFPEN a rencontré plus de 450 entreprises et a plus que doublé le nombre de contrats signés.



DES PARTENARIATS CIBLÉS
POUR DÉTECTER LES
OPPORTUNITÉS

Pour identifier les opportunités de collaborations avec des PME ou jeunes entreprises innovantes et améliorer la veille sur de nouveaux domaines, IFPEN peut compter sur un riche réseau de partenaires : incubateurs ciblés, réseaux de soutien à l'innovation ou encore réseau des Carnot.



FOCUS

Le soutien aux start-up innovantes se traduit également par une participation à des fonds d'investissement spécialisés dans les éco-industries ou les éco-énergies, qui investissent dans de jeunes entreprises ou PME proposant des services ou technologies innovants.



UN GROUPE EN TRANSITION

La crise sanitaire et ses conséquences économiques ont continué à marquer l'année 2021.

Si le niveau d'activité des principales filiales du groupe IFPEN, Axens, Beicip-Franlab et IFP Training, est resté en retrait par rapport à ce qu'il était avant la crise sanitaire, la transition écologique est toutefois restée porteuse d'opportunités. En cohérence avec la R&I, les filiales du groupe ont poursuivi leur développement en faveur des NTE. Ainsi, en avril, Axens a acquis FlowVision, entreprise spécialisée dans les solutions de réduction des oxydes d'azote. Elle a également renforcé son offre dans le domaine du recyclage des plastiques. En septembre, IFP Training a noué un partenariat avec l'EIT InnoEnergy, institut d'innovation européen chargé d'accompagner la transition énergétique. L'objectif : contribuer au déploiement, en France et en Europe, de formations dédiées aux batteries sur toute la chaîne de valeur, de la conception jusqu'au recyclage. Beicip-Franlab a quant à elle réalisé des prestations de conseil sur des sujets en géothermie et captage du CO₂ pour des grands groupes énergétiques.

FAIT MARQUANT

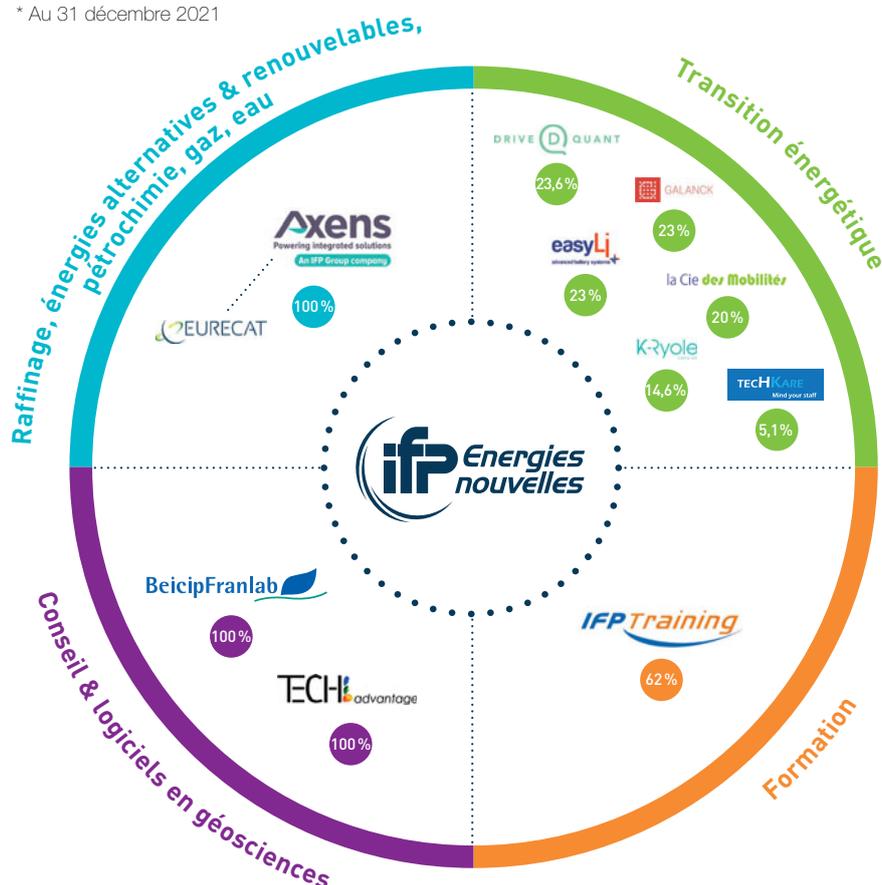


Jeux olympiques et paralympiques 2024 : Geovelo™ lauréat de l'appel à innovations mobilités

Le projet « Challenge olympique à vélo » de la société La Compagnie des Mobilités a été retenu avec 20 autres projets dans le cadre de l'appel à innovations mobilités « Jeux olympiques et paralympiques 2024 » du ministère de la Transition écologique. Le projet, qui entre dans la thématique « nouvelles mobilités et mobilités actives », vise à inciter à la pratique du vélo pendant toute la durée des JOP 2024, grâce à un suivi de l'activité à vélo des fans et des participants via l'application Geovelo™. L'objectif : créer une réelle émulation pour faciliter et encourager le développement de la mobilité vélo de façon pérenne. Rappelons qu'IFPEN accompagne le développement des modèles et services intégrés dans l'application.

PORTEFEUILLE DES PARTICIPATIONS INDUSTRIELLES*

* Au 31 décembre 2021



COMPTES CONSOLIDÉS DU GROUPE IFPEN EN 2021

882,3 M€
Chiffre d'affaires

36,5 M€
Résultat d'exploitation

12,9 M€
Résultat net part du groupe

FORMER LES TALENTS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Pour répondre aux défis énergétiques et écologiques du XXI^e siècle, IFP School forme des talents immédiatement opérationnels dans les domaines de l'énergie et de la mobilité durable. À travers une offre de formation basée sur un modèle pédagogique résolument innovant et un important réseau partenarial composé d'acteurs académiques et industriels en France et à l'international, l'École apporte des réponses aux attentes sociétales et aux besoins de l'industrie.



UNE OFFRE DE FORMATION ADAPTÉE À L'ÉVOLUTION DE L'INDUSTRIE ET DE LA SOCIÉTÉ

IFP School, école d'application, est reconnue pour son offre de formation d'excellence

dans les domaines de l'énergie et de la mobilité durable, notamment via l'apprentissage depuis 1996. En septembre 2021, elle a intégré son propre centre de formation d'apprentis (CFA) et forme des talents pour accompagner la transition écologique et répondre aux besoins de l'industrie et de la société. Signe de son attractivité, l'effectif de la nouvelle promotion est en augmentation, avec un taux d'apprentis record de 64 %. Malgré la pandémie, IFP School a assuré avec succès une continuité pédagogique en faisant évoluer ses parcours de formation vers un format hybride, ou digital lorsque le contexte l'exigeait, et en développant des modules de réalité virtuelle.

Être opérationnel dans un environnement en mutation

L'offre de formation basée sur le *learning by doing* est adaptée de façon continue aux grands enjeux énergétiques et couvre quatre domaines : Motorisations et mobilité durable, Économie et management de l'énergie, Procédés pour l'énergie et la chimie, Géoressources et énergie. Les enseignements dispensés au sein de dix programmes menant à des diplômes d'ingénieur spécialisé préparent de jeunes talents à être immédiatement opérationnels dans un environnement en constante mutation, et à contribuer au développement des nouvelles technologies de l'énergie et des transports. L'engagement et l'esprit d'ouverture de l'École face aux défis énergétiques s'illustrent par exemple à travers le module « Innovation et entrepreneuriat », consacré en 2021 à l'adaptation au changement climatique, ou encore via l'évolution des contenus pédagogiques du programme *Petroleum Economics and Management* devenu *Energy Technology Economics and Management*.

La reconnaissance de la qualité des enseignements s'est notamment traduite par la coaccréditation des masters orientés recherche obtenue courant 2021, avec l'université Paris-Saclay pour deux d'entre eux et l'université de Lille pour le troisième.

En outre, les élèves et doctorants se sont à nouveau distingués en étant récompensés par des jurys professionnels : champions du monde du *Laurie Dake Challenge* organisé par l'*European association of geoscientists and engineers* (EAGE) ; 3^e prix du *Student Challenge* de la Société des ingénieurs de l'automobile ; 1^{er} et 2^e prix du meilleur article étudiant attribués par l'Association française des économistes de l'énergie (AEE), etc.

FAITS MARQUANTS



IFP School labellisée HappyAtSchool® 2022

L'École a obtenu fin 2021 le label HappyAtSchool® qui récompense les écoles où il fait bon étudier et bon vivre, à partir de cinq critères : la qualité des installations et le respect de l'environnement, l'enseignement académique, la vie étudiante, la proximité avec les entreprises et la confiance en l'avenir. Recommandée à 91,3 % par les élèves de la promotion 2021, IFP School figure ainsi parmi les écoles d'ingénieurs françaises offrant la meilleure expérience étudiante.

Une délégation d'élèves a assisté à la présentation du plan d'investissement France 2030 par Emmanuel Macron, au Palais de l'Élysée en octobre 2021.

IFP School, en tant qu'acteur investi dans l'accompagnement de la transition énergétique et écologique, a en effet été



solicitée pour contribuer au débat. Dans cette optique, les élèves invités ont préparé une synthèse des idées et de la vision de l'ensemble de la promotion sur les grands défis à relever et les actions à mettre en œuvre, dont, à titre d'exemple, la mise en avant de l'hydrogène comme solution « zéro émission » ; une thématique par ailleurs inscrite au programme de différents cursus de l'École et développée par le LAB e-NOV™ dans un module de formation en ligne accessible à un public plus large.

UNE PÉDAGOGIE QUI SE RÉINVENTE EN CONTINU

En tant qu'école d'application, IFP School est à la pointe de l'innovation pédagogique. Elle propose un modèle agile, adapté aux nouveaux usages du numérique, qui évolue en lien avec les attentes des nouvelles générations d'étudiants et des industriels. L'introduction des *soft skills* dans les programmes contribue en outre au savoir-être des élèves, préparés à la diversité du monde du travail. L'année 2020 avait été marquée par l'accélération de la digitalisation des programmes. L'année 2021 a confirmé cette transformation avec, par exemple, le succès réitéré des Mooc sur la mobilité de demain et sur la transition énergétique. Ce dernier a été décliné sous forme d'un module contenant une sélection de vidéos, jeux et webinaires, accessibles gratuitement. Un nouveau module sur l'hydrogène et la mobilité est aussi au programme en 2022. Cette capacité à innover s'illustre également à travers les nombreuses réalisations du LAB e-NOV™, le laboratoire des cultures digitales, au service de l'École, du groupe IFPEN et des entreprises partenaires, ou encore à travers la personnalisation des parcours. En effet, IFP School propose aux élèves de personnaliser une partie de leur cursus. Ils ont ainsi l'opportunité de suivre des cours électifs qui visent à les aider à explorer des filières en dehors de leur programme de formation ou à réaliser un projet, individuel ou en équipe, leur permettant de nourrir leur projet professionnel.

LAB e-NOV™ : UNE ANNÉE 2021 PROLIFIQUE



L'année 2021 a vu se concrétiser avec succès plusieurs projets développés par le LAB e-NOV™, espace physique et virtuel, créé par IFP School début 2020 pour favoriser la promotion et l'accompagnement des initiatives en matière de pédagogie et d'innovation. Parmi les réalisations, la majorité est destinée aux élèves, comme des modules en réalité virtuelle dans le domaine des motorisations (groupes motopropulseurs électrique et hybride) et des procédés. D'autres sont destinées aux salariés d'IFPEN : modules d'exercices incendie ; outil de visite virtuelle interactive des deux sites d'IFPEN pour les nouveaux arrivants, ou encore celle d'une unité pilote ; assistance au déploiement d'une formation sur le harcèlement. Les actions ont également pris la forme de coproduction de séries vidéo et podcast. Le LAB e-NOV™ a par ailleurs poursuivi sa collaboration avec *Axens Academy* pour le développement de modules e-learning et de Spoc (*Small private online courses*), des cours en ligne privés répondant aux besoins spécifiques des équipes de la filiale d'IFPEN.



UNE DYNAMIQUE DE DÉVELOPPEMENT SOUTENUE

En 2021, malgré un contexte sanitaire difficile, les opérations d'essaimage menées par IFP School, en partenariat avec IFP Training, ont pu se dérouler.

La deuxième promotion des masters *Petroleum upstream techniques & economics* et *Petroleum downstream techniques & economics* en collaboration avec l'Institut national polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INPHB) a ainsi été accueillie en Côte d'Ivoire. Citons également la 19^e édition du master *Petroleum Engineering and Project Development*, l'un des premiers programmes d'essaimage d'IFP School, qui se déroule au Nigeria. La dynamique de développement s'est par ailleurs traduite par un élargissement des partenariats industriels avec une vingtaine de nouvelles entreprises dont des acteurs de la transition énergétique, de la finance et du conseil.

Le développement d'IFP School repose également sur la mise en valeur des activités de recherche à travers les quatre chaires d'enseignement qu'elle porte : *Electricity and Digital Transition (EDT)* ; *Electric, Connected and Autonomous Vehicles for smart mobility (ECAV)* ; *Carbon Management and negative CO₂ emissions technologies towards a low carbon future (CarMa)* dans le cadre de laquelle des conventions ont été signées avec le CNRS et INRAE ; *Electrolyte Thermodynamics (EleTher)* démarrée en 2021. L'École compte par ailleurs un actif réseau de plus de 16 000 alumni qui contribue à son rayonnement. Son implication s'illustre à travers l'animation de clubs, dont cinq à l'international, ou encore par la participation de ses membres aux IFP School *Voices*, une série de webinaires lancée en 2020 et dont le succès a conduit à leur pérennisation en 2021. Ces conférences au format court, destinées aux élèves de l'École, à ses diplômés et au personnel du groupe IFPEN, abordent des sujets d'actualité et explorent les tendances et innovations dans les secteurs de l'énergie et des motorisations.



Interview de
Arash Farnoosh, IFP School,
titulaire de la chaire EDT,
responsable du programme
Executive Master of Management
in Energy



C'est dans le cadre d'un secteur en pleine mutation que nous avons lancé la chaire en Électricité et transition digitale en 2018. Il devenait en effet incontournable de comprendre les évolutions de l'industrie de l'énergie en termes de transport, de distribution et de production dans un monde sous contrainte carbone ayant recours à des énergies renouvelables intermittentes et non stockables. À l'heure du bilan, ses résultats sont significatifs et les élèves en ont bénéficié dans le cadre des enseignements : la chaire a couvert les aspects technico-économiques, la gestion, mais aussi la numérisation de l'électricité au travers notamment de la digitalisation de ses outils, les données massives, l'information en temps réel, l'intelligence artificielle et les méthodes d'apprentissage machine de plus en plus partie intégrante des systèmes électriques à venir.

En outre, les publications (12 articles scientifiques depuis sa création), les conférences et workshops, un travail de thèse sur les enjeux techniques et économiques associés à l'intégration des énergies renouvelables au réseau, et enfin l'invitation du Professeur Peter Cowling (University of York, Royaume-Uni), spécialiste de l'optimisation et de l'algorithmique, ont contribué encore davantage à préparer concrètement nos élèves aux enjeux du secteur. »

CONSEIL DE PERFECTIONNEMENT

au 1^{er} décembre 2021

Philippe Geiger

Directeur adjoint de la direction
de l'Énergie du ministère
de la Transition écologique

Pierre-Franck Chevet

Président d'IFP Energies nouvelles

PERSONNALITÉS DE L'INDUSTRIE

Hélène Beuchot

Perenco, directrice des Ressources
humaines

Philippe Franza

ExxonMobil, directeur des Ressources
humaines

Castano Magali

Technip Energies, Senior Vice President
People & Culture

Olivier Peyret

Schlumberger France,
président-directeur général

Bruno Covin

Renault, directeur de la Stratégie
et de l'ingénierie avancée GMP & EV
de l'alliance Renault Nissan

Sandra Roche-Vu Quang

Elengy, directrice générale

Marie-Isabelle Filliette

TotalEnergies, chef de département –
direction Stratégie et politique RH

Éric Zielinski

Saipem SA, Plant engineering manager

ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR OU RECHERCHE

Dominique Bonvin

EPFL, professeur

Mohamed Gabsi

ENS Paris-Saclay, professeur des
universités de classe exceptionnelle

Elisabeth Crépon

ENSTA Paris, directrice

Sophie Mougard

ENPC, directrice

ANCIENS ÉLÈVES

Nathalie Brunelle

TotalEnergies, directrice du projet
TotalEnergies Paris-Saclay

Christian Dupraz

Consultant pour Axens

Alain Delage

Stellantis, ingénieur en chef avant-projet
Chaînes de traction électrifiées 2026+

Jean-Baptiste Renard

Consultant, expert en énergie

Assistent en outre au Conseil de perfectionnement des représentants élus du personnel d'IFP School et des élèves.

IFP Energies nouvelles

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

IFP Energies nouvelles Lyon

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

www.ifpenergiesnouvelles.fr

Retrouvez IFPEN et IFP School sur les réseaux sociaux



• **Rédaction:** IFPEN • **Conception-réalisation:** WAT - wearetogether.fr - 22003_03165

• **Crédits photos et illustrations:** Adobe Stock ; Happy Funky Family ; IFPEN ; Laurent Wargon - Objectif Images ; Ministère de la Transition énergétique ; Sabine Serrad - Objectif Images.

Droits de reproduction, textes et illustrations réservés. ISSN 2426-2390.

RÉPONDRE AUJOURD'HUI AUX ENJEUX DE DEMAIN

- + 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.

WWW.IFPENERGIESNOUVELLES.FR

+