

—  
INNOVER  
LES ÉNERGIES

2022 **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\_\_
- Données sociales & financières 06\_\_
- L'actualité 2022 d'IFPEN : panorama 07\_\_

## DÉVELOPPER AUJOURD'HUI LES INNOVATIONS DE DEMAIN

- Climat, environnement et économie circulaire 11\_\_
- Énergies renouvelables 17\_\_
- Mobilité durable 22\_\_
- Hydrocarbures responsables 27\_\_
- Une recherche fondamentale au service de l'innovation 30\_\_

## ENCOURAGER ET SOUTENIR L'INNOVATION 34\_\_

## 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

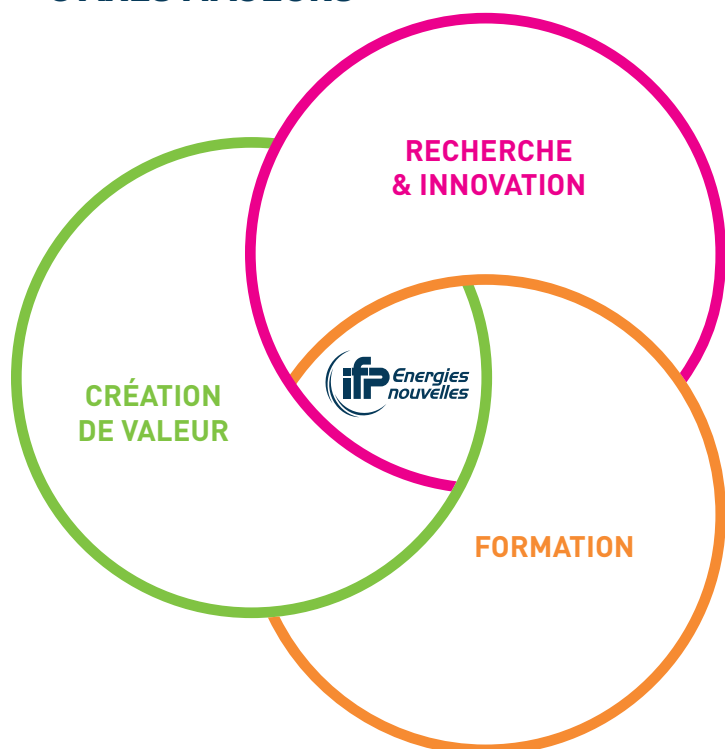


GAGNER EN EFFICACITÉ  
ÉNERGÉTIQUE



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 et 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

---



## INNOVER POUR UN MONDE DÉCARBONÉ ET DURABLE

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

En juin 2022, les résultats de notre démarche Horizon 2035, fruit d'un travail collectif démarré en 2021 et visant à élaborer une vision stratégique, ont été présentés au conseil d'administration.

Cette vision dessine la trajectoire d'IFPEN pour 2035 au niveau de ses programmes de recherche et de son organisation. Afin d'établir des priorités, 35 technologies ont été analysées. Une vingtaine a été identifiée comme d'intérêt public majeur, répartie en trois catégories selon leur niveau de maturité : maîtrisées, prometteuses, prospectives. Par exemple, les technologies maîtrisées sont, ou seront très prochainement, au stade du démonstrateur préindustriel parmi lesquelles le CCUS, les carburants durables d'aviation ou le recyclage des plastiques.

Concernant les technologies considérées comme prometteuses, on peut citer le recyclage des métaux des catalyseurs et des batteries, la qualification et la gestion des sols, la digitalisation dans la mobilité ou encore la mobilité hydrogène.

## IFPEN manifeste sa volonté de s'ouvrir davantage et de mieux prendre en compte les attentes de la société civile dans ses programmes de recherche.

Ces travaux de recherche appliquée sont pilotés depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2023 par quatre nouveaux centres de résultats : « Systèmes énergétiques », « Produits énergétiques », « Chimie pour l'industrie » et « Mobilité ».

Toujours en lien avec Horizon 2035, je salue la mise en place de notre nouveau comité des parties prenantes, dont Michèle Pappalardo a été nommée présidente lors du conseil d'administration d'octobre 2022. Ce comité traduit la volonté d'IFPEN de s'ouvrir davantage et de mieux prendre en compte les attentes de la société civile dans ses programmes de recherche et dans la conduite de ses activités, et d'enrichir en conséquence sa stratégie.

Je soulignerai également en 2022 le succès de l'organisation par des équipes IFPEN, et pour la première fois en France – à Lyon – du congrès GHGT sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui a attiré 1 200 participants du monde entier. Dans le domaine du captage du CO<sub>2</sub>, un pilote industriel a démarré fin octobre sur le site ArcelorMittal de Dunkerque ; il doit permettre de vérifier les performances du procédé DMX™ développé dans les laboratoires d'IFPEN depuis plus de dix ans.

Pour illustrer notre souhait de travailler de façon collective, je citerai la signature du premier accord-cadre avec le CEA, ou encore notre engagement dans le nouvel Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (Ofremi) en novembre.

Concernant la recherche fondamentale, IFPEN copilote trois programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) adossés aux stratégies nationales d'accélération, dans les domaines de la décarbonation de l'industrie avec le CNRS, des produits biosourcés et carburants durables avec l'INRAE, de la digitalisation et décarbonation des mobilités avec l'Université Gustave Eiffel. Des feuilles de route ont été élaborées pour soutenir la politique nationale de recherche dans ces domaines.

Enfin, il est dans l'ADN d'IFPEN de valoriser les résultats de sa R&I, ce qui se traduit notamment par une politique active de dépôts de brevets. Je suis fier que l'étude parue début 2023, menée conjointement par l'Office européen des brevets et l'Agence internationale de l'énergie, qui présente les grandes tendances des technologies de l'hydrogène pour la période 2011-2020, positionne IFPEN à la deuxième place mondiale du classement des organisations de recherche publiques ayant déposé le plus de demandes de brevets à l'international dans ce domaine.

Vous trouverez dans ce rapport d'activité un panorama des travaux menés en 2022 par les équipes d'IFPEN en vue d'innover pour un monde décarboné et durable et de former les jeunes générations d'ingénieurs à ces enjeux.

Je crois plus que jamais en notre ambition et en l'avenir que nous construisons collectivement.

Bonne lecture !





# LA GOUVERNANCE D'ENTREPRISE

## LE COMITÉ EXÉCUTIF\*



### DIRECTION GÉNÉRALE

1

**Pierre-Franck Chevet**  
Président

2

**Catherine Rivière**  
Directrice générale adjointe  
Recherche & Innovation

3

**Éric Lafargue**  
Directeur général adjoint  
Administration et gestion des filiales

### DIRECTEURS DES CENTRES DE RÉSULTATS

4

**Benjamin Herzhaft**  
Systèmes énergétiques

5

**Florence Delprat-Jannaud**  
Produits énergétiques

6

**Cécile Barrère-Tricca**  
Chimie pour l'industrie

7

**Gaëtan Monnier**  
Mobilité

8

**Christine Travers**  
Formation

9

**Nathalie Alazard-Toux**  
Développement industriel

### AUTRES MEMBRES DU COMITÉ EXÉCUTIF

10

**Véronique Ruffier-Meray**  
Directrice des Ressources humaines

11

**Dominique Humeau**  
Directeur Sciences et technologies  
du numérique, Digital Office  
et Système d'information

\* Au 1<sup>er</sup> février 2023.

## 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 & l'Innovation, représentant la ministre de l'Enseignement supérieur et de la recherche

**Louis de Franclieu**  
Adjoint au sous-directeur, 3<sup>e</sup> sous-direction, direction du Budget, représentant le ministre de l'Économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique

**Isabelle Wallard**  
Présidente de la section de la régulation et des 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 collège 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 et Innovation, 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 Recherche & Développement et Marketing, Powertrain Driveline Systems Product Group, Valeo

**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), ministre de l'Économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, mission « Énergie »

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

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

## LE CONSEIL SCIENTIFIQUE\*

**Luc Vervisch, Président**  
Professeur des universités à l'Institut des sciences appliquées de Rouen (laboratoire CORIA)

**Philippe Cassagnau**  
Professeur des universités à l'université Lyon 1, directeur du pôle Recherche Lyon Polymer Science & Engineering, président du Groupe français de rhéologie

**Carmen Claver**  
Professeur de chimie inorganique à l'université Rovira i Virgili de Tarragone (Espagne)

**Christophe Coperet**  
Professeur de chimie moléculaire et titulaire de la chaire de chimie de surface et interfaces à l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse)

**Marc-Olivier Coppens**  
Ramsay Memorial Professor et Directeur du département de génie chimique à University College de Londres (Royaume-Uni)

**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

**Sylvie Dequin**  
Chef du département Microbiologie et chaîne alimentaire à l'INRAE (Jouy-en-Josas)

**Jocelyne Erhel**  
Directrice de recherche à l'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 la ville de Paris (ESPCI)

**Nicolas Moes**  
Professeur des universités à l'École centrale de Nantes, Institut de recherche en Génie civil et Mécanique et membre de l'Académie des sciences

**Nicolas Petit**  
Professeur à Mines ParisTech, directeur du Centre automatique et systèmes (CAS)

**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 (DR1) à Inria (Saclay), codirecteur du groupe TEAM (Intelligence artificielle & Machine Learning)

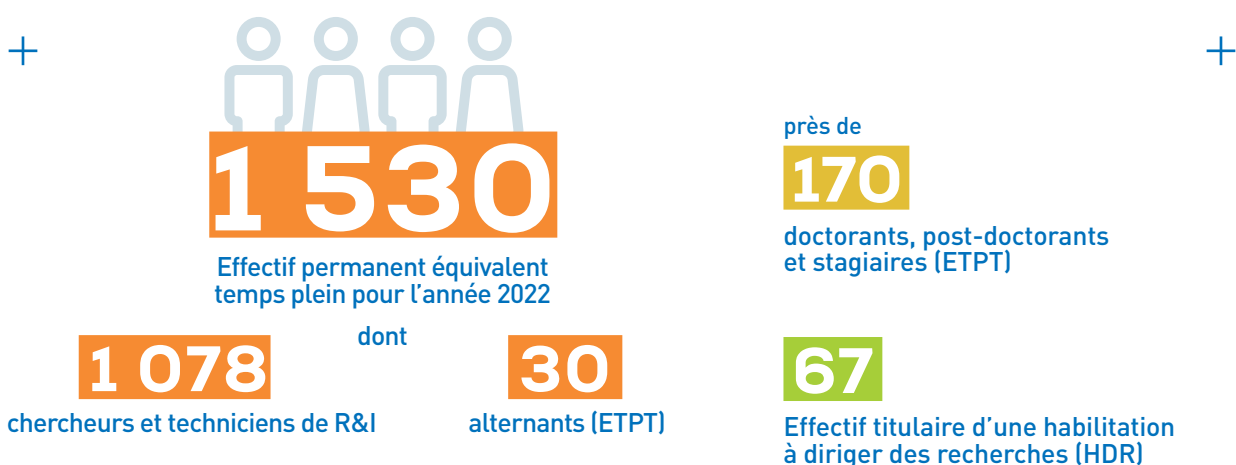
**Sophie Violette**  
Professeur d'hydrogéologie, École normale supérieure de Paris

# 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

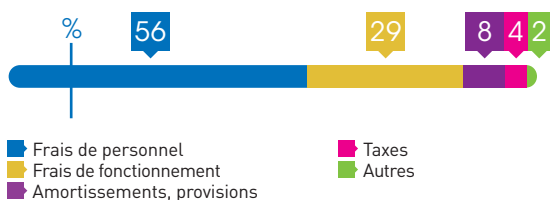
Les ressources propres enregistrent un ralentissement résultant principalement d'un recul des redevances partiellement compensé par l'augmentation des prestations et recherches collaboratives. Les charges opérationnelles sont en décroissance. L'autofinancement des activités « hydrocarbures » s'est renforcé en 2022, la dotation budgétaire est intégralement consacrée au financement des activités NTE d'IFPEN.



Poids des NTE dans la R&I IFPEN en 2022	%
Total NTE	72
Climat environnement économie circulaire	16
Énergies renouvelables	23
Mobilité durable	13
Recherche fondamentale transverse	20

### RÉPARTITION DES CHARGES OPÉRATIONNELLES

Clôture 2022



### RÉPARTITION DES PRODUITS OPÉRATIONNELS

Clôture 2022





# L'ACTUALITÉ 2022 D'IFPEN : PANORAMA



## OBJECTIF DE NEUTRALITÉ CARBONE POUR 2050 L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE ADOpte LA RÉsOLUTION

L'adoption de la résolution définissant la neutralité carbone en 2050 comme objectif climatique pour l'aviation civile internationale a été approuvée en octobre 2022 lors de la 41<sup>e</sup> assemblée de l'OACI. Cette résolution traduit l'engagement – dans la voie de la décarbonation du secteur aérien – des États\*, des acteurs de l'aviation et de l'énergie, dont IFPEN, qui en ont cosigné l'appel préparatoire à travers la déclaration de Toulouse en février 2022. Les cosignataires, prenant en compte les attentes sociétales en matière de décarbonation des transports, en particulier de l'aviation, ont apporté des propositions pour atteindre la neutralité carbone grâce à une amélioration technologique des avions, une utilisation des biocarburants plus importante, la tarification du carbone ou encore via des incitations financières et le soutien à l'innovation environnementale et climatique. À ce titre, Pierre-Franck Chevet est intervenu pour souligner la volonté d'IFPEN de contribuer à la transition énergétique et écologique de l'industrie aéronautique en apportant un accompagnement technologique pour la production de biocarburants avancés.

\* Les 27 États de l'UE, 10 États de la Conférence européenne de l'aviation civile (Albanie, Géorgie, Islande, Moldavie, Monaco, Norvège, Royaume-Uni, Saint-Marin, Serbie, Suisse).

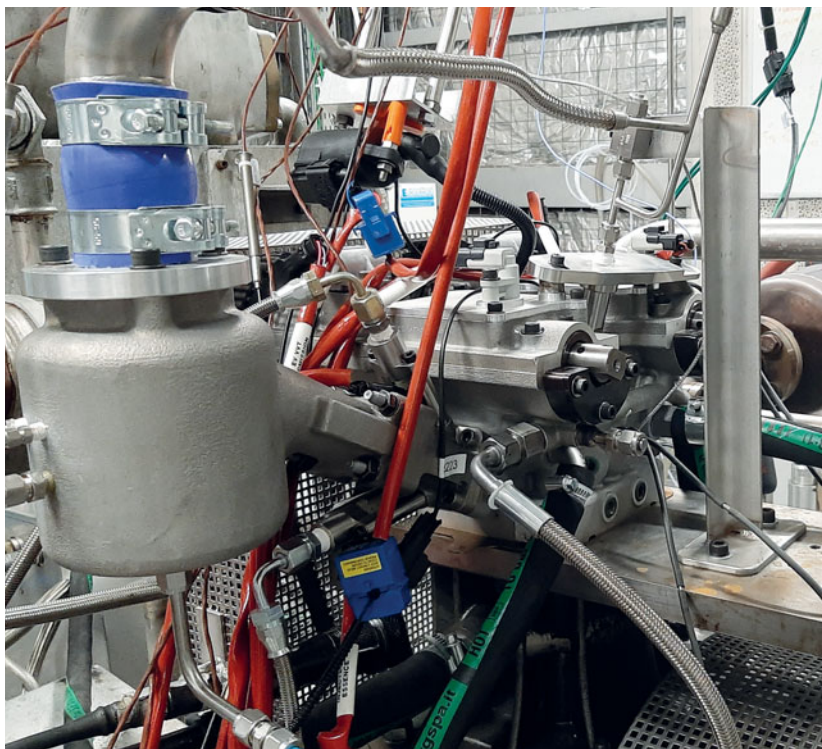
## IFPEN COORGANISE LE CONGRÈS GHGT-16 SUR LE CAPTAGE, LE STOCKAGE ET L'UTILISATION DU CO<sub>2</sub>

Fort de plus de vingt ans de travaux de R&I dans le domaine du CCUS, IFPEN a coorganisé, en partenariat avec le Club CO<sub>2</sub>, l'ADEME, le BRGM et TotalEnergies, la 16<sup>e</sup> édition du congrès international de l'IEAGHG (*International energy agency greenhouse gas*) R&D programme sur les technologies de contrôle des gaz à effet de serre. À l'heure où les objectifs de décarbonation appellent à accélérer les réductions des émissions de CO<sub>2</sub>, cet événement a constitué le point de convergence de la recherche internationale sur les technologies CCUS, réunissant plus de 1 200 participants autour de ces solutions qui contribuent à l'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris sur le climat signé en 2015.



## FOCUS

**L'appel à projets générique 2022 de l'ANR a donné lieu à quatre nouveaux projets impliquant IFPEN.** Ils visent à lever des verrous scientifiques dans des domaines aussi variés que le stockage souterrain d'hydrogène, la géothermie profonde avec coproduction de lithium dans le rift rhénan, le refroidissement liquide de moteurs électriques et l'optimisation topologique des batteries à base de carbure de silicium. IFPEN participe par ailleurs à de nouveaux projets sélectionnés dans le cadre du programme Horizon Europe.



## IFPEN PARTAGE SON EXPERTISE AUPRÈS DE LA MISSION SUR LE RISQUE HYDROGÈNE

Une délégation interministérielle composée de membres du conseil général de l'économie (CGE - ministère de l'Économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique) et du conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD-ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires) a été reçue en juin sur le site d'IFPEN-Lyon dans le cadre d'une mission sur le risque hydrogène. La présentation des travaux et la visite des installations R&I ont permis de partager l'expertise d'IFPEN sur les thématiques de la mobilité H<sub>2</sub>, du transport et du stockage d'H<sub>2</sub>, avec notamment un focus sur la tenue des matériaux et le transport longue distance par LOHC (molécules organiques liquides porteuses d'H<sub>2</sub>).



## IFPEN PARTICIPE À LA PREMIÈRE **JOURNÉE INTERNATIONALE DE LA GÉODIVERSITÉ À L'UNESCO**

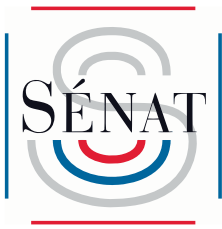
Le 6 octobre, à l'occasion de la première édition de la journée internationale de la géodiversité, proclamée par l'Unesco et soutenue par plus de 70 États et 130 organisations, le projet d'application mobile RockNet® d'IFPEN a fait l'objet d'une exposition au siège de l'organisation à Paris. L'application vise à faciliter l'accès aux connaissances géologiques, grâce à un modèle d'intelligence artificielle analysant les photos de roches prises par les utilisateurs. La participation d'IFPEN à cette journée internationale s'inscrit dans le cadre du partenariat noué entre IFPEN et l'Unesco en 2020 pour l'étude et la promotion de la géodiversité.



## FOCUS

### **Benoît Noetinger et ses partenaires obtiennent une bourse ERC Synergy pour étudier les aquifères karstiques**

Benoît Noetinger, chercheur IFPEN, docteur en physique, spécialiste du transport en milieu poreux aléatoire, est lauréat, avec Bojan Mohar de l'université de Ljubljana (Slovénie), Philippe Renard de l'université de Neuchâtel (Suisse) et Marco Dentz de l'IDAEA-CSIC (Espagne), d'une prestigieuse ERC Synergy Grant pour le projet de recherche fondamentale KARST. La bourse permettra à cette équipe de recherche internationale et multidisciplinaire d'étudier les lois physiques qui régissent l'écoulement de l'eau et le transport des polluants dans les systèmes de grottes souterraines (aquifères karstiques). En effet, comprendre les mécanismes de formation des karsts et étudier l'impact du changement climatique sur ces aquifères représentent un enjeu important pour continuer d'alimenter en eau une grande partie de l'humanité.



## FAVORISER L'ÉMERGENCE DE CHAMPIONS INDUSTRIELS EN FRANCE : LA MISSION D'INFORMATION DU SÉNAT AUDITIONNE IFPEN

En février 2022, Pierre-Franck Chevet et Nathalie Alazard-Toux, directrice du centre de résultats Développement industriel, ont été auditionnés dans le cadre de la mission d'information du Sénat : « Excellence de la recherche et de l'innovation, pénurie de champions industriels : cherchez l'erreur française », et ont souligné l'importance des liens entre la recherche et le secteur industriel pour valoriser au mieux l'innovation. L'objectif : pointer les obstacles rencontrés par la France pour renforcer sa recherche appliquée et définir les moyens de préserver et de cultiver aujourd'hui son vivier d'innovations, afin de disposer demain de grands champions européens.



## LES DEUX CARNOT IFPEN ŒUVRENT À DÉPLOYER DES SOLUTIONS À FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Le Carnot IFPEN Transports Energie (TE) et le Carnot IFPEN Ressources Energétiques (RE) ont participé aux rendez-vous Carnot 2022, en octobre. Le Carnot IFPEN TE a mis en avant ses solutions innovantes pour la mobilité connectée, l'électrification, les motorisations à faible impact environnemental dont les motorisations à hydrogène et les piles à combustible. Un focus particulier a porté sur « les enjeux de la mobilité servicielle (MaaS) ». Deux moteurs électriques innovants développés par les équipes d'IFPEN étaient également présentés sur le stand. Le Carnot IFPEN RE a de son côté présenté, sur son stand dédié aux énergies renouvelables, une maquette du flotteur d'éolienne développé en partenariat avec SBM Offshore. Ces journées ont par ailleurs donné le signal de lancement de son nouveau site internet. D'autre part, dans le cadre de la nouvelle alliance inter-Carnot dédiée aux énergies à faible impact carbone (EFIC) dont il est l'un des membres fondateurs, le Carnot IFPEN RE a co-organisé en décembre, avec le PEXE (les éco-entreprises de France et ses réseaux) et l'ADEME, la 5<sup>e</sup> rencontre Ecotech® Énergie rassemblant les acteurs de l'écosystème de la transition énergétique.



## LES 5 ALLIANCES DE RECHERCHE FRANÇAISES CONTRIBUENT AUX NOUVELLES ORIENTATIONS POUR LA RECHERCHE ET LA FORMATION EN EUROPE



Dans le cadre de la présidence française du Conseil de l'Union européenne (PFUE), Ancre, actuellement présidée par Pierre-Franck Chevet, et les alliances Aviesan, Allistene, AllEnvi et Athena ont organisé en mars 2022 à Strasbourg la conférence « Europe en transition : les défis pour la recherche et la formation ». L'objectif de l'évènement : renforcer les coopérations scientifiques transeuropéennes pour identifier de nouvelles voies de recherche et de formation interdisciplinaires, aux interfaces entre les domaines de l'énergie, de l'environnement, de la santé, du numérique et des sciences humaines et sociales. À l'issue de la conférence, un manifeste pour de nouvelles orientations pour la recherche et la formation a été publié.



+  
**BREVETS : IFPEN SE DISTINGUE  
DANS LE DOMAINE DES  
TECHNOLOGIES H<sub>2</sub>**

L'étude *Hydrogen patents for a clean energy future*, menée conjointement par l'Office européen des brevets (OEB) et l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et présentant les grandes tendances des technologies de l'hydrogène pour la période 2011-2020, indique qu'IFPEN se positionne à la deuxième place mondiale dans le classement des organisations de recherche publique ayant déposé le plus de demandes de brevets à l'international, dans le domaine des technologies H<sub>2</sub>. Par ailleurs, pour la troisième année consécutive, IFPEN se classe troisième parmi les centres de recherche déposants de brevets auprès de l'INPI. IFPEN est également à la troisième place du classement général INPI des déposants de brevets 2021 en France, aux côtés de grands groupes industriels, et apparaît dans le top 5 dans le domaine de la chimie.



+  
**FOCUS**

À la suite d'un partenariat de quatre ans entre 2017 et 2020, le **CEA et IFPEN renforcent leur collaboration en signant leur premier contrat-cadre de collaboration de recherche et développement dans le domaine de l'énergie**. D'une durée de cinq ans, il s'articule autour de quatre thématiques scientifiques d'intérêt commun : la mobilité, l'économie circulaire du carbone, le numérique et l'enseignement. Une alliance qui favorisera l'émergence de projets communs de recherche (collaboratifs, bilatéraux, encadrement de thèses, etc.), en s'appuyant sur les expertises scientifiques et techniques de chacun et sur la complémentarité des savoir-faire.

+  
**FOCUS**

**IFPEN est partenaire de L'Esprit Sorcier TV, la chaîne de la science et de l'environnement** qui propose des programmes scientifiques permettant de découvrir les dernières avancées de la recherche de façon originale. Des chercheurs IFPEN participeront à des émissions inédites tout au long de l'année. Par ailleurs, la chaîne rediffuse les meilleurs moments de la dernière Fête de la science dont l'émission « Recyclage des plastiques » qui présente les travaux d'IFPEN dans ce domaine.

+  
**CHIFFRES CLÉS**



# CLIMAT, ENVIRONNEMENT ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Face à l'enjeu climatique, à l'impact des activités humaines sur l'environnement et à 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 CO<sub>2</sub>, le recyclage des plastiques et des métaux provenant de catalyseurs et de batteries, l'amélioration de la qualité de l'air, de la résilience des sols et du cycle de l'eau.



## CARBONE ET POLLUTION PLASTIQUE DANS LES SOLS : IFPEN SE MOBILISE

Conscient des enjeux climatiques que représentent les sols, qu'il s'agisse de la pollution ou de la question du stockage du carbone, le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques (RE) a noué de nombreuses collaborations scientifiques en 2022 sur ces thématiques. Coordonné par l'Institut de recherche pour le développement (IRD, Eco&Sols, Montpellier) et mené en partenariat avec IFPEN, l'Agriculture & agri-food Canada, le Geographical Institute (Hongrie), l'université de Milan (Italie), le projet SIC-SOC-DYN (*Organic and inorganic carbon dynamics in calcareous soils*), financé par l'ANR, a pour but de mieux appréhender la contribution des sols calcaires, sols couvrant un tiers de la surface de la Terre, au bilan carbone global. Plus précisément, il s'agit d'étudier les interactions SIC (*Soil inorganic carbon*) et SOC (*Soil organic carbon*) dans ces sols calcaires à partir d'un ensemble d'échantillons prélevés dans divers contextes (usage, mode de gestion, etc.), puis de les analyser au moyen des récents développements de la technologie Rock-Eval®. Face à la problématique de la pollution plastique des sols, IFPEN via le Carnot IFPEN RE a en outre démarré deux nouveaux projets : e-DIP, financé par l'ANR, vise à évaluer la toxicité des microplastiques sur la matière organique du sol, également au moyen de Rock-Eval®, et, en appui d'e-DIP, Plastisol, financé par l'ADEME, vise à définir des indicateurs de la présence de microplastiques dans les sols.



### Interview de Hassan Boukcim, CEO de Valorhiz



*C'est dans le cadre d'un projet France Relance, destiné à maintenir et à soutenir l'emploi des chercheurs en poste ou des jeunes diplômés, que Valorhiz et IFPEN ont noué un partenariat portant sur le développement de méthodes d'analyse de sols sableux, caractérisés par leur faible teneur en carbone. Mieux comprendre la dynamique de la matière organique peu stable de ces sols, moins étudiés que les sols riches en carbone en dépit de leur potentiel de stockage, permettrait de les utiliser comme des puits de carbone pour répondre aux enjeux de sécurité alimentaire ou de régulation climatique. Les méthodologies Valorhiz de mesure, ainsi que notre expertise en termes de réhabilitation des sols couplées au savoir-faire IFPEN sur la matière organique et son outil de caractérisation Rock-Eval®, doivent permettre de mettre au point une méthodologie spécifiquement adaptée. Recruté pour une durée de quinze mois, un ingénieur en matière organique des sols, partagé entre IFPEN et Valorhiz, constituera un panel de différents échantillons représentatifs, à partir de notre base de données, pour leur analyse et la formulation des nouveaux descripteurs. Valorhiz ambitionne à terme d'intégrer cette nouvelle méthodologie dans des outils d'aide à la décision, particulièrement précieux dans le cadre des stratégies d'atténuation. »*



+  
**FOCUS**

En 2022, IFPEN a démarré un projet sur la gestion de la ressource et le traitement des eaux qui comprend la caractérisation des aquifères complexes, et en particulier des aquifères karstiques (voir page 8).

+  
**FAIT MARQUANT**

**Un événement dédié aux ressources et usages du sous-sol dans la transition énergétique**

En septembre 2022, IFPEN a coorganisé, en partenariat avec le CNRS, le pôle Avenia, le BRGM et l'ADEME, le colloque Ressources et usages du sous-sol dans la transition énergétique. L'événement, qui a rassemblé les différentes parties prenantes (collectivités, institutionnels, société civile, chercheurs...) s'intéressant à la façon dont le sous-sol peut répondre à la nécessité de transition écologique, a permis d'apporter des réponses concernant la légitimité des différentes filières d'ingénierie du sous-sol et les conditions de réalisation de projets sur le sol français.



+  
**FAIT MARQUANT**



**Mieux quantifier la pollution des microplastiques dans l'environnement**

Face notamment à la généralisation de la pollution par les plastiques et les microplastiques, le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) a fait du renforcement de la résilience des écosystèmes l'un de ses objectifs. C'est dans ce contexte que le Carnot IFPEN RE a décidé d'intégrer la question du flux de déchets plastiques dans l'environnement à ses orientations stratégiques. Ainsi, cette disposition aura permis, en 2022, de mener des discussions avec le Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (CEDRE) dans le but de développer une méthode expérimentale de quantification rapide des microplastiques dans les milieux naturels.

+  
**FOCUS**

**Une étude menée par une équipe pluridisciplinaire incluant David Sebag, ingénieur géologue IFPEN, et coordonnée par l'université de Leeds a été publiée dans la revue Nature.** Elle fait le lien entre le réchauffement climatique et la décomposition de la tourbe dans le bassin central du Congo entre 5000 et 2000 av. J.-C., provoquant un important rejet de carbone dans l'atmosphère.

L'étude a bénéficié de plusieurs outils d'analyse, et en particulier de la méthode Rock-Eval 6 grâce à laquelle le degré de dégradation de la matière organique a pu être quantifié avec précision. L'une des conclusions affirme que si un scénario identique se reproduisait dans le futur, une telle libération de carbone ne pourrait qu'accélérer encore davantage le changement climatique en cours.



## IFPEN LEADER DES TECHNOLOGIES DE CAPTAGE DE CO<sub>2</sub>

Alors que le rapport du GIEC appelle à une réduction immédiate des émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'à l'accélération du captage et du stockage du CO<sub>2</sub>, IFPEN joue un rôle clé dans le développement de technologies innovantes de captage du CO<sub>2</sub>. Le consortium du projet sino-européen CHEERS (Horizon 2020), dont IFPEN fait partie aux côtés de TotalEnergies, Dongfang Boiler Group Co. (DBC) et l'université de Tsinghua, a réalisé la construction de la plus grande unité de démonstration au monde de combustion en boucle chimique (CLC). Cette technologie d'oxycombustion permet d'obtenir un flux de CO<sub>2</sub> pur compatible avec un captage à bas coût, car elle réduit au minimum le recours à des procédés coûteux de séparation des gaz. C'est une étape importante franchie après treize années de recherche conduites par IFPEN et TotalEnergies, qui a pour objectif de qualifier le potentiel industriel de cette technologie clé pour contribuer ainsi à la décarbonation de l'industrie. La campagne d'essais est prévue pour 2023 et conduira au développement de futurs projets commerciaux. En 2022, s'est clôturé le projet Strategy CCUS auquel participaient IFPEN, le BRGM et 16 autres partenaires européens. L'objectif : donner un cadre stratégique au déploiement coordonné et à grande échelle de la chaîne de valeur des technologies de captage, stockage, transport et valorisation du CO<sub>2</sub>. IFPEN a pris part à travers le Carnot RE à l'élaboration et à l'évaluation des scénarios pour chacune des trois régions du sud de l'Europe sélectionnées comme potentiels clusters de déploiement : la vallée du Rhône, le bassin de l'Èbre dans le nord-est de l'Espagne et le bassin lusitanien au centre-ouest de la côte portugaise. Le projet Strategy CCUS a déjà donné naissance à un nouveau projet H2020, PilotSTRATEGY, démarrée en mai 2021 pour cinq ans, qui vise à caractériser en détail des aquifères salins profonds pour s'assurer de la disponibilité de sites de stockage. En parallèle, les équipes IFPEN ont également contribué en 2022, dans le cadre du projet européen REX-CO<sub>2</sub>, à l'élaboration d'un outil numérique d'aide à la décision pour la réutilisation de puits de production pétrolière et gazière en fin de vie en vue du stockage de CO<sub>2</sub>.



## + FOCUS

En octobre 2022, IFPEN a coorganisé la 16<sup>e</sup> édition du congrès de l'IEAGHG (*international energy agency greenhouse gas*) sur les technologies de contrôle des gaz à effet de serre, avec le Club CO<sub>2</sub>, l'ADEME, le BRGM et TotalEnergies (voir page 7).



**Interview de  
Laurent Viellard,  
responsable des  
opérations du  
projet 3D à IFPEN**

*Développé dans les laboratoires d'IFPEN depuis plus de dix ans, le procédé de captage de CO<sub>2</sub> DMX™ a franchi une étape importante avec le démarrage du pilote industriel 3D, projet Horizon 2020 mené aux côtés d'Axens, ArcelorMittal et TotalEnergies, sur le site d'ArcelorMittal de Dunkerque. Notre objectif ? Démontrer un procédé innovant de captage du CO<sub>2</sub> des fumées de gaz sidérurgique. Après la conception du pilote en atelier sous forme de modules, l'assemblage, la réception et le test de l'installation, l'ultime étape a consisté à verser le solvant – innovation au cœur de la technologie du fait de son efficacité, de sa compétitivité et de sa durabilité – dans les colonnes de l'installation pour sa mise en circulation, une fois injecté le gaz de haut fourneau à décarboner. Pour optimiser son fonctionnement sur les unités industrielles futures, nos équipes exploreront également les performances de l'installation au moyen de tests paramétriques et testeront le pilote sur une plus longue durée. Au-delà, nous préparons dès aujourd'hui le déploiement de la technologie : l'implantation d'une première unité industrielle sur le site d'ArcelorMittal à Dunkerque, qui pourrait être opérationnelle à partir de 2025, et la conception du futur cluster européen Dunkerque-Mer du Nord, qui devrait être capable de capter, conditionner, transporter et stocker 10 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an et devrait être opérationnel à l'horizon 2035. »*



## ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DES TRANSPORTS

Pour relever les défis de la transition écologique dans le domaine de la mobilité des personnes et des biens, les acteurs publics, les industriels et les citoyens ont besoin d'être accompagnés dans le choix des technologies les mieux adaptées aux nouvelles exigences. C'est par exemple le cas lors de la mise en œuvre, en France, de zones à faibles émissions (ZFE) pour répondre aux problématiques de qualité de l'air dans les grandes agglomérations (> à 150 000 habitants). Le Carnot IFPEN Transports Energie (TE) répond à ces besoins en réalisant des études d'impact combinant différents types de données et de simulations ainsi que des analyses de cycle de vie. Ces études sont souvent couplées à des webservices pour les rendre évolutives et accessibles au plus grand nombre. Dans la lignée de l'outil web grand public « Je change ma voiture » ou encore de l'étude technico-économique pour l'évolution des systèmes de propulsion du secteur fluvial menée avec VNF (voir le rapport d'activité 2021 IFPEN, page 24), l'année 2022 a été marquée par des travaux destinés à alimenter les feuilles de route des différentes filières de la mobilité. Ainsi, dans le cadre du projet SESAME cofinancé par l'ADEME, le Carnot IFPEN TE a évalué l'intérêt de la mesure embarquée des émissions de polluants grâce au dispositif REAL-e™ d'IFPEN afin de proposer une amélioration du contrôle technique des véhicules, en effectuant des tests sur un parc existant. Par ailleurs, à la demande de l'ADEME, a été réalisée l'étude E4T 2040 : une analyse prospective sur les technologies à privilégier pour répondre aux enjeux de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport routier d'ici 2040. Le Carnot IFPEN TE a également conçu, en collaboration avec la Fabrique de la logistique, l'outil « Verdir ma flotte », qui offre aux acteurs du secteur de la logistique devant décarboner leurs flottes la possibilité de quantifier l'impact économique et écologique de carburants alternatifs et de technologies hybrides et électriques. Enfin, il a conduit une large étude pour le Concawe\*, visant à évaluer l'empreinte environnementale des véhicules hybrides rechargeables (PHEV) en conditions réelles d'utilisation.



**Interview de  
Roland Dauphin,  
coordinateur  
scientifique sur la  
qualité des carburants  
et leurs émissions  
à Concawe**



*Le Concawe\* a commandé une étude visant à promouvoir une approche basée sur les analyses de cycle de vie (ACV) des véhicules sans se limiter aux émissions qui sortent du pot d'échappement. IFPEN a réalisé un travail remarquable en extrapolant les résultats expérimentaux par l'usage de simulations et de modèles mathématiques et en générant des cas d'usage bien au-delà de ce que pouvaient fournir les données expérimentales. Ces travaux ont donné lieu à un rapport conséquent, à plusieurs publications ainsi qu'à une application web. Cette dernière est déclinée sous une forme simplifiée accessible au grand public et sous une forme plus complète pour les experts. Elle est notamment utilisée pour appuyer les argumentaires des adhérents de notre association qui souhaitent faire valoir l'approche ACV. L'application permet de se rendre compte de la diversité des solutions bas carbone disponibles dont l'électrification fait évidemment partie à condition que le mix énergétique ne soit pas trop carboné et que les batteries ne soient pas trop volumineuses. Les véhicules hybrides rechargeables ou non en font également partie, à condition qu'ils puissent utiliser des carburants bas carbone et, dans le cas des véhicules rechargeables, à condition de recharger les batteries régulièrement. Forte de ce succès, notre ambition est de poursuivre ces travaux en 2023. »*

*\* Concawe est une division de l'association européenne des fabricants de carburants.*





## QUALITÉ DE L'AIR : LA FLAIR BOX™ EST DÉPLOYÉE SUR LE SITE DE TERÉGA

Après le développement de la gamme d'outils Flair en 2021 (voir le rapport d'activité 2021 IFPEN, page 14), un ensemble de capteurs et de logiciels permettant d'explorer une zone géographique donnée pour détecter les polluants d'origine naturelle ou industrielle, IFPEN a procédé en 2022 à l'installation de huit stations Flair Box™ (sept fixes et une mobile) chez son partenaire gazier Teréga, dans le but d'acquérir et d'exploiter davantage de données liées à la présence de THT et de mercaptan sur son site. Il s'agit d'une première installation industrielle pour la Flair Box™.



### FAIT MARQUANT

#### Rewind® PET : l'industrialisation du recyclage chimique du PET en bonne voie

Axens et Toray Films Europe étudient la construction d'une première unité de recyclage du PET basée sur le procédé Rewind® PET développé par IFPEN, Axens et Jeplan, qui implique une dépolymérisation optimisée du PET par glycolyse associée à des étapes de purification spécifiques visant à éliminer tous les composés organiques et inorganiques présents dans les déchets de PET. Les nouvelles unités seront intégrées à l'usine de polymérisation existante installée à Saint-Maurice-de-Beynost (Ain). Objectif : recycler 80 000 tonnes/an de déchets plastiques PET difficiles à valoriser et produire jusqu'à 100 % de PET recyclé transparent pour les applications de films, de fibres et de bouteilles aptes au contact alimentaire.



## RECYCLAGE CHIMIQUE DES PLASTIQUES

IFPEN est présent sur les différentes boucles de recyclage chimique des plastiques via le développement de solutions technologiques durables destinées à transformer les déchets plastiques en matières polymères recyclées d'excellente qualité. Aux côtés de leurs partenaires, les chercheurs d'IFPEN développent des technologies éprouvées et viables économiquement afin de pouvoir traiter, en complément du recyclage mécanique, presque tous les types de plastiques et d'offrir des solutions aux industriels pour répondre aux attentes croissantes de la société en matière de réduction des déchets plastiques conformément aux politiques publiques relatives à l'économie circulaire. En 2022, la technologie Rewind® Mix de purification des huiles de pyrolyse, développée avec Axens et Repsol, a été homologuée sur charge de haute qualité à la suite de travaux de R&I conduits sur charge industrielle de dissolution des polyoléfinés qui ont mené à des niveaux de pureté conformes à la cible. Concernant le recyclage du PET, la mise en œuvre industrielle du recyclage chimique s'est accélérée.



### FAIT MARQUANT

#### Rewind® Mix : un premier accord de licence signé entre Axens et Borealis

Borealis et Axens ont signé un accord de licence pour la fourniture du procédé Rewind® Mix développé par IFPEN, Axens et Repsol. L'objectif : traiter les impuretés comme le silicium, les composés chlorés, les dioléfinés et les métaux sur 50 kilotonnes/an d'huiles de pyrolyse obtenues à partir de déchets plastiques, dans l'usine pétrochimique de Borealis à Stenungsund, en Suède. Cette étape de purification va permettre l'utilisation directe 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.

## FOCUS

À l'occasion de la Fête de la science 2022 consacrée au changement climatique, deux chercheuses IFPEN sont intervenues dans l'émission consacrée au recyclage des plastiques. Le replay est disponible sur la chaîne YouTube de l'Esprit Sorcier.



## Interview de **Magalie Roy-Auberger,** responsable du programme **Recyclage des métaux des catalyseurs à IFPEN**



*En 2022, la preuve de concept et de rentabilité économique sur les métaux de catalyseurs a été réalisée en quelques mois et a permis de poser les bases d'un procédé de lixiviation acide des métaux et de réincorporation directe. Ces premiers résultats très prometteurs ont montré tout le potentiel des solutions hydrométallurgiques, séparatives ou non, vis-à-vis de l'explosion de la demande en métaux critiques et ont ouvert les réflexions sur le recyclage des métaux des batteries. Avec la part croissante de l'électrique dans la mobilité, le recyclage des matériaux de batteries devient indispensable, non seulement pour répondre à la réglementation européenne mais aussi pour assurer l'indépendance du marché européen. IFPEN, Eurecat et Axens regroupent toutes les compétences, de la gestion des déchets à la chimie minérale en passant par l'évaluation des cellules de batteries, pour se positionner sur ce marché et exploiter les déchets électroménagers (mine urbaine) de demain. »*



## RECYCLAGE DES MÉTAUX CRITIQUES



Le recyclage des métaux critiques utilisés dans la préparation des catalyseurs et des matériaux de cathode pour batteries tels que le cobalt, le nickel, le lithium et, dans une moindre mesure, le molybdène est un enjeu stratégique de l'économie circulaire. IFPEN, en collaboration avec des partenaires industriels et

académiques, développe des procédés de transformation de la matière, des matériaux et solvants pour proposer des solutions performantes sur les plans technique et économique. Depuis le début de l'année 2022, Eurecat (acteur mondial de la régénération et de l'activation des catalyseurs et du recyclage des matériaux à base de métaux), Axens et IFPEN ont lancé un projet dédié au recyclage des métaux des catalyseurs et destiné à développer un procédé d'extraction des métaux de catalyseurs d'hydrotraitement, afin de les valoriser en boucle fermée à travers la préparation de catalyseurs neufs. Les équipes d'IFPEN développeront le procédé d'extraction acide des catalyseurs permettant de récupérer une solution qui sera réutilisable directement par Axens pour préparer de nouveaux catalyseurs à partir des métaux des catalyseurs usés fournis par Eurecat. L'année a également permis d'approfondir les réflexions sur le marché du recyclage des métaux de CAM (Cathode active material) des batteries lithium-ion et de leur resynthèse.



## DÉCARBONATION DES PROCÉDÉS ET CONVERSION DU CO<sub>2</sub>

Depuis 2022, les équipes d'IFPEN approfondissent l'évolution des procédés décarbonés par le biais de l'utilisation d'hydrogène décarboné, d'électricité et de biomasse, et la valorisation du CO<sub>2</sub>. Afin d'accompagner le développement du marché des e-fuels, IFPEN a lancé avec Axens le développement d'une technologie permettant la production de CO à partir de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub> (réaction dite de *Reverse Water Gas Shift*). En effet, la proposition de réglementation de la Commission européenne du package *Fit for 55* (14/07/2021), dite *ReFuelEU Aviation*, propose une incorporation minimum de 5 % d'e-fuel dans les carburants d'aviation en 2035 et de 28 % en 2050. Pour respecter ces ambitions, il est nécessaire de disposer de procédés fiables et capables de fortes capacités. IFPEN a développé avec Axens et Eni la technologie commerciale *Gasel*<sup>®</sup> (qui repose sur une synthèse Fischer-Tropsch et un upgrading). Le développement de la brique amont (*Reverse Water Gas Shift*) et du captage de CO<sub>2</sub>, par exemple sur émetteurs industriels via le procédé DMX<sup>™</sup>, permettra de compléter cette technologie pour disposer d'une chaîne complète depuis le captage du CO<sub>2</sub> jusqu'à la production de carburants de synthèse.





# 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.



## RÉPONDRE AUX DÉFIS DE L'ÉOLIEN EN MER GRÂCE À LA DIGITALISATION

Le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques (RE) se positionne dans le domaine des éoliennes en mer, qui peuvent profiter de technologies déjà matures utilisées pour l'industrie offshore.

Ainsi, le Carnot IFPEN RE a développé dans le cadre de son partenariat avec Vaisala, le logiciel WiSE-Lidar™ WindField de reconstruction 3D du champ de vent à partir de mesures réalisées par un lidar. Le logiciel a été mis sur le marché en 2022. Intégrées dans la solution WindBox de Vaisala, les hautes capacités de détection du vent du logiciel optimisent le pilotage des éoliennes en l'adaptant à chaque instant aux conditions de vent, améliorant ainsi leur performance. Réduire la fatigue mécanique de l'éolienne permet aussi de réduire ses coûts de maintenance, tout en augmentant sa durée de vie. Enfin, cette meilleure adaptabilité des éoliennes au vent permet d'optimiser leur design en concevant de plus grandes pales ou de plus hautes tours, de réduire les coûts d'investissement et de maximiser la production d'énergie. Une avancée technique de poids pour l'éolien en mer qui s'est notamment appuyée sur l'expertise d'IFPEN en matière de traitement de signal avancé.

Alors que l'énergie éolienne se développe rapidement, offrant ainsi de nouvelles possibilités d'exploiter les ressources du vent, le Carnot IFPEN RE a lancé le JIP Wind Avatar pour mieux répondre aux défis que posent les éoliennes en mer. Par quel moyen ? En appliquant le concept de jumeau numérique récemment émergé dans le domaine de la digitalisation et dont le principe consiste à combiner les données d'une éolienne opérationnelle avec des algorithmes et des modèles physiques pour connaître son état de fonctionnement. L'objectif de cet avatar : mieux diagnostiquer les anomalies potentielles des éoliennes, suivre leur usure, prédire la durée de vie de leurs composants, détecter des baisses de production électrique et, en fin de compte, optimiser la production et la maintenance.

### FAIT MARQUANT

#### Les journées scientifiques de l'éolien :

##### un vent nouveau sur un secteur en croissance

Les acteurs français de l'éolien se sont réunis en octobre 2022 pour la première édition des « journées scientifiques de l'éolien ». Organisée par France Énergie Éolienne et le Carnot IFPEN RE, cette conférence visait à faire le point sur les dernières avancées de la recherche mais aussi à accompagner la croissance du secteur à la veille du 12<sup>e</sup> colloque national éolien, à l'heure où la France est amenée à y jouer un rôle plus important. Académiques et industriels ont ainsi pu partager leur savoir-faire et nouer de nouvelles alliances. IFPEN s'est distingué notamment au travers de ses interventions sur la modélisation des sillages éoliens, la contribution du GP5 Ancre à la synthèse des besoins R&I de l'éolien et la participation au projet OC6 d'IEA-Wind via une étude aérodynamique et la détection de défauts sur un rotor d'éolienne.



## LA GÉOTHERMIE : UN ATOUT POUR RÉDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES CHAMPS PÉTROLIERS

Le Carnot IFPEN RE accompagne ses partenaires industriels pétroliers vers l'utilisation de la géothermie afin de décarboner leurs opérations. Ainsi, en 2022, IFPEN a mené avec sa filiale Beicip-Franlab une étude visant à réutiliser les puits de pétrole pour la production géothermique via la récupération de la chaleur des fluides. L'évaluation de la ressource en chaleur a été réalisée ainsi que l'étude de la conversion possible en énergie électrique. L'analyse a été complétée par le calcul de l'évolution, au cours des vingt prochaines années, du potentiel de production électrique.



### FAIT MARQUANT



#### IFPEN, acteur de deux nouveaux projets à financement public sur la géothermie

Le Carnot IFPEN RE participe à deux nouveaux projets de géothermie. Fin octobre 2022 démarrait le projet HocLoop financé par Horizon Europe. Aux côtés de ses partenaires, VITO, Norce, les universités de Florence, Bari, Darmstadt et Vaasa, le Carnot IFPEN RE évalue une nouvelle technologie en boucle fermée se basant sur un puits vertical prolongé par une partie horizontale profonde. Le fluide circule dans l'annulaire puis dans le tube central séparé par un isolant. L'ensemble constitue un échangeur thermique en circuit fermé exploitant la chaleur du sous-sol. Les équipes étudient en particulier l'ensemble des phénomènes associés à cette technologie au moyen de leur savoir-faire et de leurs outils en matière de modélisation du réservoir, du puits et des équipements de surface. Elles travailleront également à l'optimisation du design en fonction des propriétés du sous-sol et des possibilités de recharge thermique. Par ailleurs, le projet Gliter, financé par l'ANR en partenariat avec le BRGM et Lithium de France, porte sur l'évaluation du potentiel de coproduction géothermie et lithium du fossé rhénan. Le projet a aussi démarré fin 2022.



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

Le caractère intermittent de certaines énergies renouvelables implique un besoin accru de flexibilité pour assurer l'équilibre entre production et consommation. Dans ce contexte, les technologies de stockage et de gestion sont essentielles pour assurer la stabilité globale et locale des réseaux électriques. Les équipes du Carnot IFPEN RE se focalisent sur le développement de technologies de stockage d'énergie par air comprimé (AA-CAES) de forte capacité, ainsi que sur la consolidation d'une offre de gestion de l'énergie (*EMS-Energy management system*), afin de faciliter l'intégration des renouvelables sur les réseaux.



Lancé en 2021, le projet TranZAE s'est poursuivi en 2022. Attribué par l'ADEME en 2021 et porté par CSTB, dont IFPEN via son Carnot RE est partenaire avec le Cerema et Enedis, le projet développe 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. Au moyen d'un moteur de recherche, IFPEN traite une base de données intégrant des données cadastrales, fournies par IGN, et des données électriques, fournies par Enedis, pour recenser et classer les zones à fort potentiel photovoltaïque, le stockage stationnaire et les bornes de charge, en intégrant les coûts des technologies, de l'électricité et des services réseaux.



### Interview de **Louis Londe, directeur technique, Projets et Innovation chez Geostock**

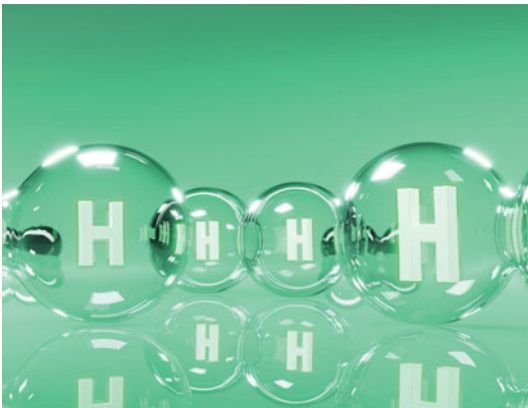
*Partenaires de longue date, Geostock et IFPEN ont travaillé étroitement ensemble en 2022 sur une solution de stockage d'énergie souterrain par air comprimé AA-CAES (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage), particulièrement clé pour la transition écologique. Comprimé dans des cavernes lorsque l'électricité est abondante, l'air est ensuite déstocké pour produire de l'électricité au moyen d'une turbine. On compense ainsi le caractère intermittent des énergies éoliennes et des panneaux solaires. Afin d'améliorer le rendement, les calories de la compression sont stockées dans un stockage thermique et injectées dans la turbine lors de la production d'électricité. Nous avons ainsi mutualisé nos expertises respectives : la compression et le stockage de la chaleur relèvent des compétences d'IFPEN tandis que celles de Geostock concernent le stockage souterrain en cavité. Ce partenariat a constitué une opportunité pour Geostock de développer sa technologie, et ce avec la possibilité de la promouvoir auprès de nouveaux prospects. Cette collaboration s'est soldée par un succès puisqu'elle s'est in fine concrétisée par une étude réalisée pour le compte de TotalEnergies, un client que nous souhaitons démarcher sur le sujet du CAES. Une première étape importante pour Geostock dans la perspective de réaliser un pilote industriel. »*





## HYDROGÈNE ET MAÎTRISE DES RISQUES

Dans le domaine de l'hydrogène, en parallèle des travaux liés à la mobilité (voir page 23), le Carnot IFPEN RE évalue l'impact de l'hydrogène sur les matériaux afin notamment de pouvoir assurer la sécurité du réseau de transport. Des travaux sont également réalisés pour évaluer les risques et la faisabilité technique des futures opérations de stockage massif de l'hydrogène dans le sous-sol. Ainsi, le Carnot IFPEN RE est partenaire du projet HyStorEn sur le comportement de l'hydrogène dans le sous-sol, sélectionné dans le cadre de l'appel à projets ANR 2022 et financé au titre de « projet de recherche collaborative – entreprise (PRCE) ».



+

### FAIT MARQUANT

#### Un consortium au plus près des besoins des industriels

IFPEN et l'Institut de la Corrosion ont lancé début 2022 une « communauté » dont l'objectif est de fédérer des partenaires industriels autour d'une meilleure compréhension du comportement des matériaux en présence d'hydrogène dans des conditions de tests variés (MRC - *Membership Research Consortium*). L'année a été particulièrement fructueuse avec l'adhésion de 24 industriels, montrant l'intérêt du secteur pour la thématique hydrogène. Dans ce consortium, IFPEN et l'Institut de la Corrosion associent leurs compétences et leurs moyens d'essais pour fournir aux industriels des capacités spécifiques d'analyse. La communauté est lancée pour une durée initiale de trois ans.



## RÉDUCTION DE L'EMPREINTE CARBONE DES TRANSPORTS



IFPEN développe des technologies éco-efficaces pour produire des carburants alternatifs aux carburants fossiles dans le but d'élargir le mix énergétique dans les transports et d'en limiter l'impact environnemental. En 2022, IFPEN s'est fortement impliqué dans le projet BioTJet soutenu par l'ADEME afin de préparer l'implantation en France de la première industrielle de la technologie BioTfuel® pour la production de biojet à partir de biomasse. On notera également le lancement en 2022 d'un projet *Ethanol-to-jet* avec Axens.

+

### FAIT MARQUANT

#### Décarbonation de l'aviation : le projet BioTJet prend son envol

Le projet BioTJet de production de carburants aéronautiques durables, piloté par Elyse Energy, soutenu par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets pour les biocarburants aéronautiques durables et mené en partenariat avec Alliance Forêts Bois et Avril avec le soutien d'Axens, Bionext et IFP Investissements, a démarré. L'objectif : construire et opérer, d'ici 2027, la première unité industrielle française de production de biokérosène avancé, à partir de biomasse durable, composée de résidus issus majoritairement de la sylviculture locale et de déchets de bois. En phase avec la feuille de route française pour le déploiement des biocarburants aéronautiques durables, la stratégie nationale bas carbone et la réglementation européenne *Fit for 55*, BioTJet va permettre d'apporter une réponse immédiate aux enjeux de décarbonation du secteur aérien. L'utilisation du biokérosène avancé issu de BioTJet pourrait en effet réduire les émissions de GES d'au moins 85 % par rapport au kérosène conventionnel (sur la base d'une analyse de cycle de vie). Une option d'injection d'hydrogène vert obtenu par électrolyse de l'eau est également à l'étude. À quantité de biomasse équivalente, l'ajout d'hydrogène dans le procédé permettrait de doubler la production de carburants.





## CHIMIE BIOSOURCÉE

IFPEN développe de nouveaux procédés, catalyseurs et biocatalyseurs destinés à transformer la biomasse lignocellulosique en grands intermédiaires chimiques biosourcés, plus performants sur le plan environnemental que les mêmes produits issus de source fossile et qui répondent à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie tout en offrant une diversification de source d'approvisionnement. En 2022, les tests de performance à froid des équipements ont été réalisés sur le démonstrateur BioButterfly, qui vise à produire du butadiène à partir d'éthanol issu de biomasse en remplacement du butadiène pétrochimique. Par ailleurs, dans le cadre d'une collaboration avec la filiale d'un grand groupe français, les équipes d'IFPEN ont finalisé le développement d'un procédé de transformation de sucre. Il permettra de produire une molécule biosourcée utilisée dans la fabrication de résines non toxiques et durables pour le collage du bois.



## FOCUS

**Axens a été récompensé dans deux des seize catégories de la 6<sup>e</sup> édition des *Hydrocarbon processing awards*,** décernés par la revue majeure du domaine des procédés. Les prix ont été remis à la filiale d'IFPEN dans les catégories *Best digitalization technology*, pour la plateforme de monitoring de performance des procédés Connect'In<sup>®</sup>, et *Best petrochemical technology* pour la technologie Atol<sup>®</sup>, fruit d'un partenariat démarré en 2011 entre IFPEN, Axens, TotalEnergies, et technologie clé pour la production de biojet par la voie *Alcohol-to-jet*.



## FAIT MARQUANT

### **Plastics industry association : Bio-TCat<sup>®</sup>™, lauréat du prix de l'innovation**

La *Plastics industry association* a décerné le prix 2022 de l'innovation dans le domaine des bioplastiques à la société américaine Anellotech pour sa contribution au développement de la première bouteille en PET 100 % biosourcée grâce à la technologie Bio-TCat<sup>®</sup>™ de conversion de la biomasse lignocellulosique en aromatiques (Benzène/Toluène/Xylènes) développée dans le cadre d'un partenariat entre IFPEN, Axens et Anellotech. En effet, le pilote TCat-8<sup>®</sup> opéré par les partenaires à Silsbee (Texas) a produit le p-xylène 100 % biosourcé conforme aux spécifications pour les premiers prototypes de bouteille en PET, issus à 100 % du végétal, fabriqués fin 2021 par la société Suntory.





# MOBILITÉ

# DURABLE



La décarbonation du secteur des transports réclame des efforts de recherche accrus pour réduire toujours davantage l'impact environnemental des technologies utilisées, recourir à des sources d'énergie plus propres comme l'hydrogène, le biogaz ou l'électricité et exploiter les possibilités d'optimisation offertes par la digitalisation. Pour effectuer cette transition énergétique et écologique qui concerne les entreprises du secteur, les collectivités et les citoyens, IFPEN se mobilise en France et en Europe via son Carnot Transports Energie.



## UNE DYNAMIQUE EUROPÉENNE

L'année 2022 a été marquée par l'obtention de résultats très positifs dans les projets européens auxquels les équipes du Carnot TE prennent part. Concernant l'électrification des véhicules, ReFreeDrive, auquel le Carnot IFPEN TE participait depuis 2017 aux côtés de 12 partenaires, a permis de développer deux machines électriques synchro-réductantes sans terres rares et une électronique de puissance avec des composants à base de carbure de silicium contribuant à atteindre 99 % de rendement mesuré.

Ces machines diminuent, sur leur cycle de vie, l'énergie consommée de 57 %, ce qui réduit de 50 % le CO<sub>2</sub> émis. CEVOLVER (*Connected Electric Vehicle Optimized for Life, Value, Efficiency and Range*), dont le Carnot IFPEN TE est partenaire, s'est également achevé après quatre ans de travaux. Des résultats concluants en termes d'usage des véhicules électriques ont été présentés (voir page 26).

### Concernant les nouvelles générations de batteries, le projet Modalis<sup>2</sup> (*Modelling of Advanced li Storage Systems*),

piloté par le Carnot IFPEN TE et réunissant 10 partenaires, modélise les batteries à base de matériaux nouveaux tels que des alliages avec du silicium pour les électrodes négatives ou des électrolytes solides.

Les avancées du projet ont été présentées à Bruxelles lors de la conférence H2020RTR, organisée par la Commission européenne et les instances européennes ERTRAC, EGVIafor2Zero et CCAM.

### Concernant l'amélioration de la chaîne de traction des poids lourds,

l'assemblée générale du projet LongRun (*Development of efficient and environmental friendly LONG distance powertrain for heavy duty trucks and coaches*) s'est tenue en juin sur le site de Rueil-Malmaison. Elle a rassemblé plus de 70 participants, représentant les 30 partenaires du consortium, et a permis de présenter les principales avancées (voir page 23).

La dynamique se renforce dans le cadre d'Horizon Europe avec notamment le projet HELENA sur les batteries du futur lancé en 2022 et la poursuite des projets démarrés en 2021 sur des thématiques telles que les véhicules hybrides à faibles émissions de polluants et consommation de carburant réduite Phoenix (*PHev towards zero EmissionNs & ultimate ICE efficiency*) et le verdissement des ports et des aéroports (OLGA, MAGPIE).



## L'AMÉLIORATION DU RENDEMENT DES MOTORISATIONS BAS CARBONE

L'atteinte des objectifs ambitieux de réduction de 30 % des émissions de CO<sub>2</sub> des poids lourds en 2030 par rapport à 2019 requiert l'utilisation de systèmes de combustion avancés alimentés avec des carburants bas carbone liquides ou gazeux (gaz naturel, biogaz, hythane). Les travaux effectués en 2022 ont permis d'améliorer le rendement des motorisations utilisant ces carburants.

Lors de la présentation des avancées du projet LongRun, qui vise un ensemble complet de chaînes de traction pour poids lourds et autocars plus respectueux de l'environnement, le système de combustion IFPEN Swumble™ a affiché des rendements supérieurs de 10 à 15 % à ceux d'un moteur de série. Rappelons que dans le cadre de ce projet, le Carnot IFPEN TE apporte notamment ses compétences sur la conception et la caractérisation de systèmes de combustion pour carburants à faible impact CO<sub>2</sub> ainsi que sur le développement de services connectés d'eco-routing et d'eco-driving pour réduire l'énergie consommée en usage. En parallèle, le projet européen Phoenix (voir le rapport d'activité 2021 IFPEN, page 23), qui a pour objectif de développer un démonstrateur de véhicule hybride rechargeable avec un niveau de consommation de carburant et d'émissions de polluants réduit, s'est poursuivi avec l'objectif de contribuer 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. D'autres travaux en cours concernent la gestion et le contrôle de la boucle d'air ainsi que l'optimisation de certaines grandeurs du système de combustion, comme le taux de compression.



## LA PROPULSION HYDROGÈNE AU SERVICE DE LA MOBILITÉ DÉCARBONÉE

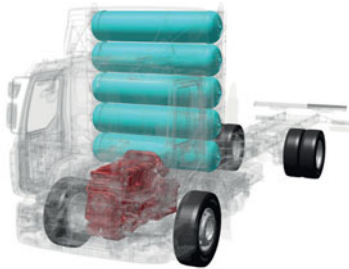
Le Carnot IFPEN TE mobilise ses efforts sur des solutions permettant d'utiliser l'hydrogène renouvelable ou bas carbone afin de réduire l'impact environnemental de la mobilité. Pour le système pile à combustible (PàC) dans l'environnement véhicule, les travaux se concentrent sur le dimensionnement de ce système, son contrôle et son électronique de pilotage pour une optimisation de l'usage, du coût et de la durée de vie, en se basant notamment sur des moyens numériques et expérimentaux uniques.

Les équipes travaillent également à l'optimisation de la combustion directe de l'hydrogène dans un moteur thermique afin d'en maximiser le rendement et d'atteindre des émissions d'oxyde d'azote quasi nulles.

**FAITS MARQUANTS**

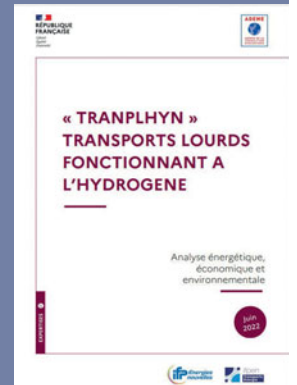
**Décarboner la mobilité lourde à moindre coût**

Le projet PLH2, coordonné par Volvo Group - Renault Trucks avec pour partenaire le Carnot IFPEN TE, fait partie des projets impulsés par le comité d'orientation pour la recherche automobile et mobilité (Coram). Il vise à équiper en motorisations thermiques à hydrogène les véhicules à fort tonnage avec un coût total de possession très proche de celui de leur équivalent diesel. Le Carnot IFPEN TE est chargé de la calibration du moteur 6 cylindres de type MDE 8. Les technologies existantes sont en cours d'adaptation avec un objectif de maîtrise des coûts. Ce moteur pourra équiper aussi bien des poids lourds que des bus. Une utilisation marine est envisagée par Volvo Penta. La base expérimentale permet aux équipes d'IFPEN de vérifier la prédictivité des codes de calcul 3D de combustion (pression dans le cylindre, vitesse de combustion, transferts thermiques aux parois...) et de balayer l'influence des paramètres de réglage (phasage de l'injection, richesse...) ou géométriques (injecteur hydrogène, bougie...) sur cette combustion.



**Étude TranpLHyn : évaluer les bénéfices de l'hydrogène pour la mobilité lourde**

En septembre 2022, IFPEN a publié, avec le soutien de l'ADEME, l'étude TranpLHyn (transports lourds fonctionnant à l'hydrogène). Elle compare sur le plan énergétique, économique et environnemental les deux modes de propulsion à hydrogène, par génération d'électricité dans une pile à combustible (PàC) ou par combustion dans un moteur thermique avec une architecture classique. Cette étude concernait quatre types de véhicule et a pris en compte quatre types de motorisation. Les principales conclusions montrent que les PàC présentent un meilleur bilan environnemental et énergétique que les moteurs thermiques à hydrogène, mais dans les deux cas le coût total de possession est multiplié par un facteur compris entre deux et trois par rapport au moteur thermique diesel avec un avantage pour le moteur à hydrogène.



**Projet HyMot : un démonstrateur pour une offre de véhicules utilitaires décarbonés**

Le projet HyMot (moteur à hydrogène), coordonné par Bosch et impliquant sept autres acteurs industriels et académiques dont le Carnot IFPEN TE, fait partie des projets sélectionnés par le comité d'orientation pour la recherche automobile et mobilité (Coram) dans le cadre du 4<sup>e</sup> programme d'investissement d'avenir.

Il vise à démontrer la faisabilité de la décarbonation d'un véhicule utilitaire par conversion de son moteur à combustion interne à l'hydrogène, en alternative à une électrification couplée à une pile à combustible hydrogène. Les travaux menés avec les partenaires ont pour but de proposer une nouvelle offre de véhicules utilitaires qui seront décarbonés et quasi zéro émission locale. Les équipes du Carnot IFPEN TE apporteront leur expertise dans le domaine des motorisations thermiques à hydrogène pour concevoir le système de combustion.

\* Renault, Alpine Racing, Faurecia, OSE Engineering, TotalEnergies, École centrale de Nantes.





## ACCOMPAGNER L'ÉLECTRIFICATION DES VÉHICULES

L'électrification des véhicules individuels est l'objectif principal de l'Union européenne pour décarboner le secteur des transports. Tous les constructeurs français sont engagés dans cette transition et le Carnot IFPEN TE accompagne cette dynamique en améliorant la performance et l'efficacité énergétique des machines électriques et des systèmes électrochimiques de stockage ou de production d'électricité.

Dans le cadre de ses travaux sur la propulsion électrique, il développe des moteurs électriques sur une large gamme de puissances.

Un ensemble moteur-onduleur intégré basse tension inédit en performances (38 kW sous 60 V), destiné à des petits véhicules électriques ou à des applications de retrofit, a été développé avec les sociétés EREM et Punch Powertrain France. Cet ensemble est industrialisé depuis 2022 par EREM. La technologie synchro-réductante utilisée pour le moteur offre d'excellentes performances avec une quantité réduite d'aimants limitant les coûts de fabrication. Des lois de commande adaptées permettent un pilotage en couple du moteur très élaboré pour compenser cette faible quantité d'aimants. Par ailleurs, une motorisation de plus forte puissance est mise au point par les équipes du Carnot dans le cadre du projet ADEME H2D2 initié en 2022 dans le cadre du programme Démonstrateurs et territoires d'innovation de grande ambition (DTIGA). L'objectif est de concevoir, prototyper et tester un groupe motopropulseur alimenté par une pile à combustible pour les véhicules de plus de huit tonnes. Enfin, le Carnot IFPEN TE développe des méthodologies pour mieux comprendre les systèmes électrochimiques, les rendre plus performants, mettre au point les nouvelles générations de batteries et en améliorer le recyclage. Un effort particulier est consacré à l'étude de l'emballage thermique des cellules de batteries. Des expériences, utilisant notamment des techniques de diagnostics optiques en enceintes transparentes, et des modélisations apportent leur éclairage sur cette problématique dans le cadre de projets collaboratifs.

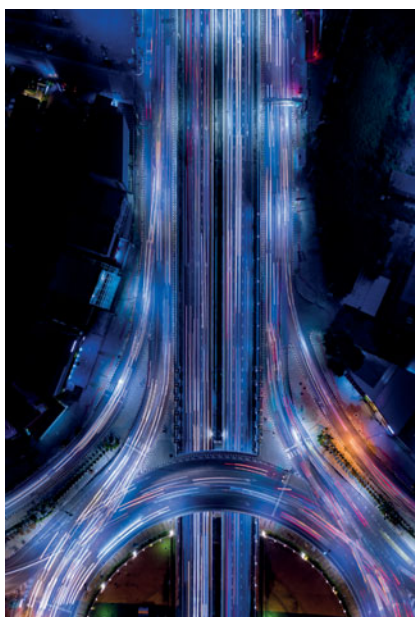
### FAIT MARQUANT

#### Projet Melchior : faciliter le recyclage des moteurs électriques

IFPEN et le CEA-Liten Énergies du futur ont démarré en 2022 le projet collaboratif Melchior (Machines électriques dans une chaîne de valeur orientée vers le recyclage). D'une durée d'un an, il vise à développer un prototype de machine électrique utilisant une technologie d'aimant recyclable. Le projet privilégiera certains matériaux et définira les architectures pour faciliter le recyclage tout en conservant un bon niveau de performances. Le Carnot IFPEN TE est chargé de la conception de cette machine électrique incluant l'évaluation de son impact environnemental, tandis que le CEA-Liten mettra en œuvre une nouvelle technologie d'aimants recyclables.



## LA DIGITALISATION, CLÉ DE VOÛTE DE LA MUTATION DES MOBILITÉS



La fin annoncée de la vente des véhicules particuliers et utilitaires légers neufs à moteur thermique en 2035 dans l'Union européenne accélère la mutation vers l'électrique mais pose des questions sur l'optimisation tant des technologies que des usages ou encore du déploiement des infrastructures associées. Dans ce contexte, le Carnot IFPEN TE développe des webservices énergétiques alimentant des sites web de partenaires au travers d'outils de compréhension et d'analyse de l'empreinte environnementale du transport individuel et collectif. Ces outils sont conçus en partenariat avec l'ADEME, la Fabrique de la logistique et l'Union des entreprises de transport et logistique de France.

Par ailleurs, IFPEN poursuit le développement de briques logicielles pour aider à la conception des systèmes de motorisation. Ainsi, IFPEN a renouvelé en 2022 son contrat de partenariat avec Siemens pour les cinq prochaines années et va ouvrir la plateforme Amesim de simulation système à deux nouvelles thématiques : la modélisation de la PàC et l'usage et l'intégration du volet *real driving emissions* (RDE) dans la simulation. Enfin, la modélisation CFD 3D est développée avec le code CONVERGE dans le cadre d'un partenariat avec la société CSI, qui a été renouvelé pour cinq ans afin d'englober notamment la mobilité électrifiée (refroidissement de machines électriques, gestion et emballage thermique des batteries).

+  
**FAIT MARQUANT**

**Fin du projet CEVOLVER : simplifier l'usage des véhicules électriques**

Le projet CEVOLVER, coordonné par FEV Group et impliquant neuf acteurs industriels et académiques\* dont IFPEN, s'est achevé en 2022. Face au temps de charge, à l'autonomie et à l'accessibilité qui sont des facteurs clés pour l'adoption plus large des véhicules électriques, CEVOLVER a mis en place une approche centrée sur l'utilisateur afin de proposer des solutions pour des trajets longue distance confortables avec une batterie bien dimensionnée et à un coût abordable. Il s'agissait d'abord de réduire la consommation d'énergie des véhicules électriques grâce à de nouveaux systèmes de gestion thermique et énergétique. La connectivité a ensuite été mise à profit pour fournir au conducteur une prédiction d'autonomie plus précise et une assistance dans la quête de l'itinéraire le plus efficace pour le voyage longue distance, dans le but de guider efficacement le conducteur tout en tenant compte des infrastructures de recharge rapide disponibles et d'une faible consommation d'énergie.

Les équipes du Carnot IFPEN TE ont développé les algorithmes d'optimisation de parcours et de plans de recharge utilisés dans cette deuxième phase du projet.



\* FEV Group, FCA-Stellantis, Ford, Bosch, IFPEN, Aachen Uv., Vrije Uv. Bruxelles, I2M, Uniresearch.

Le projet CEVOLVER a bénéficié 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° 824295.



**Interview de  
Frederik de Smet,  
ingénieur de  
recherche  
chez Ford**



*L'objectif principal du projet CEVOLVER était d'accroître la confiance des utilisateurs dans les véhicules électriques en améliorant l'efficacité énergétique, en réduisant le temps de parcours des longs trajets et en proposant des fonctionnalités nouvelles. Le projet a adopté une approche centrée sur l'utilisateur pour optimiser l'exploitation du système thermique. L'équipe Ford a apporté au projet un véhicule de démonstration basé sur le véhicule utilitaire E-Transit et a développé des scénarios d'utilisation pour l'Europe. Le matériel thermique, qui comprend des panneaux chauffants, un radiateur à basse température et un échangeur de chaleur entre deux circuits, a été optimisé pour ces scénarios. Concernant les logiciels, CEVOLVER a démontré que l'eco-charging, développé par IFPEN, minimise le temps de parcours d'un long trajet en optimisant les plans de recharge. L'autre outil d'IFPEN, l'eco-driving, réduit la consommation d'énergie sur les trajets courts. La démonstration de l'ensemble du système a été faite lors d'une excursion d'une journée de 700 kilomètres. Nous avons eu des échanges réguliers avec tous les partenaires et avec IFPEN notamment. Nos questions et inquiétudes ont toujours été bien reçues et l'équipe IFPEN a tout fait pour minimiser les retards. Leur approche très réactive a clairement contribué au succès global du démonstrateur Ford. »*

# HYDROCARBURES RESPONSABLES

Face à la nécessité de gagner en efficacité énergétique, de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> 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 les plus exigeantes. Dans le même temps, il met au point des technologies permettant de réduire les risques liés à l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures.



## BASSINS ET RÉSERVOIRS

Le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques a une expérience historique dans la conception de solutions logicielles qui permettent, à l'échelle des bassins sédimentaires, de modéliser l'évolution dynamique d'un système pétrolier et, à l'échelle des réservoirs d'hydrocarbures, de mieux caractériser les phénomènes complexes afin de mieux maîtriser la production. Ses équipes mettent aujourd'hui au point des solutions de modélisation quantitative du sous-sol, des méthodologies d'analyse de risques et des équipements de production fiables et sûrs destinés à limiter le nombre de forages dans le respect de l'environnement et à réduire les risques. Parmi les points saillants, l'année 2022 a été marquée par la mise sur le marché par KAPPA de la première version du simulateur de réservoir 3D Rubis-Puma, doté d'un simulateur d'écoulement dynamique développé par les équipes du Carnot.



## EOR

Dans un contexte où la mise en œuvre de la transition énergétique s'accélère et où le marché pétrolier reste tendu, l'industrie pétrolière est confrontée à la nécessité de réduire les coûts et de renforcer l'innovation pour produire plus et de manière plus éco-efficace. La récupération améliorée des hydrocarbures (EOR : Enhanced Oil Recovery) contribue à satisfaire la demande en produisant plus à partir des réservoirs existants, en gérant au mieux les eaux de production et en réduisant le nombre de forages. Dans cette optique, IFPEN, Beicip-Franlab et Solvay développent, au sein de l'Alliance EOR, des technologies et services adaptés aux différentes conditions de réservoir et à tous types de procédés EOR – l'EOR chimique, mais aussi l'EOR-CO<sub>2</sub> dans une optique d'utilisation et de stockage partiel de CO<sub>2</sub>. L'offre couvre toute la chaîne, depuis l'élaboration de formulations EOR au laboratoire jusqu'à la mise en œuvre sur champ.

Le JIP Dolphin 3, démarré fin 2019 avec six partenaires et visant à étudier l'impact des additifs utilisés en EOR chimique sur la gestion des eaux de production, s'est conclu après trois ans de travaux.



## **RISER ET LIGNES DE PRODUCTION**

La crise énergétique a relancé modérément les activités de forage et de production offshore. Dans ce contexte et avec la volonté d'accompagner l'industrie pour répondre aux défis climatiques, IFPEN conçoit des équipements et des solutions technologiques destinées à accéder aux ressources offshore tout en garantissant la sécurité et en maîtrisant les risques et les coûts de forage et de production. En 2022, des progrès significatifs ont été obtenus sur la caractérisation et la détection de dépôts dans les lignes de production permettant ainsi d'optimiser l'ajout d'additifs et par conséquent de réduire l'impact environnemental de cette opération.



## **CONVERSION ET PURIFICATION DES BRUTS LOURDS ET DES RÉSIDUS**

Pour répondre au besoin croissant de carburants liquides dans les pays émergents, rendre plus économique l'outil de raffinage en limitant les résidus ultimes ou convertir le brut dans un maximum de produits pour la pétrochimie, il demeure nécessaire d'accroître la capacité de conversion profonde. En parallèle, ces procédés doivent s'adapter à l'introduction grandissante de bruts lourds et extra-lourds qui réapparaissent du fait de la situation géopolitique actuelle, et qu'il conviendra de traiter de manière éco-efficace grâce à des progrès technologiques. À cet effet, IFPEN développe des solutions destinées à convertir et purifier les charges vers des produits plus propres, répondant à des spécifications de plus en plus sévères. Les procédés de conversion sont de nos jours beaucoup portés par les complexes *Oil-to-Chemicals* qui ont pour objectif de transformer une grande partie du brut en produits pétrochimiques, minimisant la production de carburants. IFPEN et ses partenaires sont pleinement parties prenantes de cette transformation importante de l'outil de raffinage. En 2022, les travaux d'IFPEN sur le procédé *Catalytic crude to chemical (CC2C)* développé en partenariat avec Saudi Aramco, TechnipFMC et Axens ont été finalisés. La technologie CC2C ainsi développée augmente considérablement l'efficacité et le rendement en produits chimiques, convertissant autour de 70 % du pétrole brut en produits chimiques très bien valorisés par le marché, sans passer par les étapes classiques de distillation atmosphérique ou sous-vide, les plus énergivores du raffinage. En simplifiant le chemin d'accès aux bases pétrochimiques et en réduisant drastiquement la production de carburants, le procédé CC2C conduit à un bilan CO<sub>2</sub> global nettement amélioré par rapport à un schéma de raffinage tel que pratiqué jusqu'à présent.

## **PRODUCTION D'INTERMÉDIAIRES PÉTROCHIMIQUES**

Alors que l'industrie de la pétrochimie connaît des transformations profondes, IFPEN développe des procédés innovants et éco-efficaces de production d'intermédiaires pétrochimiques pour accompagner la demande du marché. Ses chercheurs travaillent également à l'amélioration des performances des procédés existants, tout en accroissant le niveau de pureté des produits. L'année 2022 a été marquée par des avancées significatives dans l'élaboration d'un catalyseur pour la déshydrogénation du propane ainsi que par une meilleure définition de la technologie de séparation des xylènes à développer.

## **CONVERSION DU GAZ**

Le contexte géopolitique est favorable au développement de technologies de traitement performantes pour répondre à la demande croissante de gaz naturel. IFPEN a élaboré un ensemble de technologies allant du design de procédés à la mise au point de solvants, en passant par le développement de garnissages pour les colonnes d'absorption et poursuit ses travaux dans le domaine de la purification du gaz naturel. Aussi, les équipes IFPEN valorisent le savoir-faire acquis pour l'utiliser dans la production d'hydrogène bleu en captant le CO<sub>2</sub> émis issu du reformage du méthane. Les recherches sont aussi orientées vers le conditionnement des gaz de la transition énergétique : H<sub>2</sub> vert, CO<sub>2</sub> à stocker ou à utiliser, biométhane, etc. Les travaux sont menés en collaboration avec TotalEnergies et Axens pour ce qui est de l'hydrogène bleu.





## PRODUCTION DE CARBURANTS PROPRES



Le secteur du raffinage fait face à une mutation historique liée aux gains d'efficacité des moteurs et de la montée en puissance de l'électrification, aux réglementations et incitations publiques visant à améliorer la qualité des essences et à la nécessité d'adapter son offre en valorisant les produits transformés vers la chimie. Dans ce contexte, IFPEN développe de manière éco-efficace des catalyseurs et des procédés pour la production de carburants propres, dans le respect des spécifications produits et des objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, et accompagne la transition des outils de raffinage. L'année 2022 a été marquée par des avancées notables sur le procédé d'hydrodésulfuration des essences Prime-G+® visant à améliorer l'octane avec une dépense énergétique moindre, par la finalisation des travaux de développement d'un catalyseur d'isomérisation sans chlore des naphthas légers, et par la consolidation des travaux de R&I en vue d'un nouveau catalyseur d'aromatization de paraffines. Deux dossiers procédés ont été également livrés dans le domaine des distillats : un premier relatif à la conversion des LCO (hydrogénation profonde) et un second visant une amélioration du procédé d'hydrocraquage avec gestion d'une boucle de recyclage sur la charge non convertie. On retiendra également des avancées importantes dans la régénération des catalyseurs d'hydrocraquage.



**Interview**  
**d'Antoine Fecant,**  
**ingénieur de**  
**recherche à IFPEN**

*Prime-G+® est un procédé majeur pour la purification des carburants et leur mise aux spécifications les plus sévères : un tiers de la production mondiale d'essence est obtenu via ce procédé. Dans le cadre des actions de R&I menées à IFPEN et finalisées en 2022, des améliorations significatives ont été proposées pour accompagner la transition des outils de raffinage vers plus de sobriété et moins d'impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre. En effet, certains composés soufrés appelés mercaptans sont particulièrement difficiles à éliminer et rendent plus complexe l'atteinte des réglementations environnementales dans certaines zones du globe (notamment en Chine).*

*L'amélioration développée à IFPEN vise à ajouter, en fin de procédé, une étape d'adsorption ultra-sélective et totale des mercaptans. Cette purification ultime permet de « désévériser » les étapes amont de traitement et ainsi de diminuer les niveaux thermiques (et gagner alors en efficacité énergétique) tout comme la consommation en hydrogène d'environ 30 %, garantissant la réduction d'environ 10 % de l'empreinte carbone aux bornes du procédé. Ces gains se cumulent pour une plus haute qualité du produit puisque cette amélioration du procédé permet de passer toutes les réglementations environnementales mondiales les plus sévères. À ceci s'ajoute l'amélioration significative de l'indice d'octane de l'essence produite, ce qui offre un gain d'efficacité des moteurs, du fait d'un taux de compression plus élevé, et ainsi une réduction des émissions en CO<sub>2</sub> à l'usage. »*



# 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. De plus, pour anticiper les besoins d'innovation à long terme et pour préparer le développement de produits et procédés, IFPEN oriente en permanence ses questionnements scientifiques de façon à acquérir de nouvelles connaissances et compétences.



## UNE RECHERCHE FONDAMENTALE STRUCTURÉE...

Depuis 2016, les verrous scientifiques structurent l'ensemble du cheminement de la R&I d'IFPEN, depuis 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 appuyer les activités de recherche plus appliquées. Ces verrous sont donc eux-mêmes organisés en défis, correspondant à des obstacles plus précis à surmonter. Cette structuration est portée depuis plusieurs années par un renforcement des travaux sur les thématiques liées aux nouvelles technologies de l'énergie (NTE) et de la transition écologique. IFPEN est aussi un centre de recherche où se croisent de jeunes chercheurs de nombreuses nationalités. En 2022, une dizaine de doctorants et post-doctorants visiteurs ont séjourné dans ses laboratoires pour y mener une partie de leurs travaux de recherche, dont la moitié en provenance d'établissements étrangers. Ces séjours se sont inscrits soit dans le contexte d'une collaboration existante (par exemple,

ITN (*Innovative training networks*), projet ERC (*European research council*), chaire CarMa d'IFP School, etc.) soit ils ont simplement constitué une opportunité de travailler entre chercheurs sur des questionnements scientifiques partagés.

Les champs disciplinaires concernés ont été multiples : depuis la chimie jusqu'à l'économie, en passant par l'informatique, la thermodynamique ou les sciences de l'ingénieur. Dans le même temps, 14 thèses IFPEN étaient en cours dans le cadre de collaborations avec des acteurs industriels dont EDF, Renault, Siemens, Stellantis, TotalEnergies, la plupart dans le cadre d'une convention Cifre.

Ces thèses, dont cinq sont dirigées par des chercheurs HDR d'IFPEN, se déroulent dans sept directions de recherche ainsi qu'à IFP School, ce qui reflète bien la diversité des compétences recherchées par les industriels en travaillant avec IFPEN.

## + FOCUS

**Luc Vervisch, professeur des universités à l'Institut national des sciences appliquées de Rouen, a été nommé à la présidence du conseil scientifique d'IFPEN.**

Les recherches de Luc Vervisch portent sur la simulation numérique et la science des données appliquées à la physique des écoulements réactifs, comme ceux rencontrés en combustion. Les méthodes numériques qu'il a développées ont été mises en œuvre dans les logiciels destinés aux industries de production, de transport et de transformation d'énergie.





## + FOCUS

**Outre les PEPR SNA (Programmes et équipements prioritaires de recherche des stratégies nationales d'accélération) dont il est copilote** (PEPR sur la décarbonation de l'industrie avec le CNRS, PEPR sur les produits biosourcés et les carburants durables avec INRAE et PEPR sur la digitalisation et la décarbonation des mobilités avec l'Université Gustave Eiffel), IFPEN est impliqué dans les PEPR SNA Recyclabilité, Batteries et H<sub>2</sub>, ainsi que dans les PEPR exploratoires Sous-sol bien commun (copilotes CNRS, BRGM), Maths-vives (mathématiques pour le vivant, l'environnement et la société - pilote CNRS), FairCarboN (cycle du carbone - copilotes CNRS, INRAE), OneWater (eau bien commun - copilotes BRGM, CNRS, INRAE), NumPEX (numérique hautes performances pour l'exascale - copilotes CEA, CNRS, Inria) et Diadem (dispositifs intégrés pour l'accélération du déploiement de matériaux émergents - copilotes CEA, CNRS).

## + ... ET FORTE DE SES PARTENARIATS



La stratégie d'ouverture d'IFPEN se manifeste par le développement de partenariats, à l'image des contrats-cadres qui ont été prolongés et renforcés en 2022. Liés par un partenariat depuis 2017, le CEA et IFPEN ont signé en 2022 un premier contrat-cadre de collaboration de recherche et développement dans le domaine de l'énergie. D'une durée de cinq ans, il s'articule autour de quatre thématiques : la mobilité, l'économie circulaire du carbone, le numérique et l'enseignement. Par ailleurs, après vingt ans de partenariat, IFPEN et l'Andra ont prolongé en 2022 l'accord-cadre de collaboration en vigueur depuis 2018 pour une durée de deux ans. Objectif : améliorer la modélisation du sous-sol, la surveillance des stockages géologiques et le suivi des transferts de gaz, la simulation numérique des écoulements de fluides et la maîtrise des risques de corrosion des aciers. Nombreuses sont les thématiques qui font l'objet de collaborations avec des universités. En synthèse des matériaux et des réacteurs structurés, IFPEN a pour partenaire Politecnico di Milano, et en génie chimique et fluidisation, l'université de Naples. Dans le domaine de l'IA appliquée à l'imagerie, le centre de recherche CERVO de l'université Laval au Québec a accueilli pendant un an le chercheur d'IFPEN Maxime Moreaud pour travailler plus spécifiquement en holographie numérique. En thermodynamique des fluides complexes et des électrolytes, 2022 a vu le lancement du projet collaboratif EleTher 2, impliquant sept partenaires industriels. Pour traiter de l'hydrogène, de sa genèse dans le sous-sol et de l'étude de sa migration souterraine, en interaction avec l'environnement traversé, le groupement de recherche HydroGEMM a démarré en novembre 2022. IFPEN participe à son organisation, ainsi qu'à des actions en microbiologie et en simulation numérique des écoulements réactifs. Enfin, pour mieux concevoir et évaluer les risques propres aux systèmes complexes (énergies renouvelables, transport aérien à faible émission de CO<sub>2</sub>...), la collaboration avec Safran Tech se poursuit et enrichit l'outil web open source Lagun d'exploration de données et d'optimisation.

## + FAIT MARQUANT

**Twinn2SET : couplage de laboratoires de recherche à travers l'Union européenne pour accélérer les recherches sur les énergies durables**  
En octobre 2022, le projet européen Twinn2SET\* (*Twining to sustainable energy transition*) a été lancé par IFPEN, IFP School, l'université de Stavanger (Norvège) et l'institut grec de Géoénergie (FORTH/IG), pilote du projet, dans le but d'aider cet institut à augmenter ses capacités de recherche et de formation sur des thématiques d'énergie durable : le captage et le stockage du carbone, la géothermie profonde et le stockage souterrain d'hydrogène. Deux études exploratoires seront aussi menées en stockage d'hydrogène dans des formations géologiques et en géothermie.

\* Twinn2SET, soumis dans le cadre de l'action de coordination et de support Twining (jumelage de laboratoires de recherche de différents niveaux de maturité), a bénéficié d'un financement de la part du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne Horizon Europe au titre du projet n° 101079246.



**FAIT MARQUANT**

**LCR Carmen :  
une année florissante**

Le LCR (Laboratoire commun de recherche) Carmen a été lancé en 2019 pour cinq ans afin d'étudier les solides poreux, avec un focus sur trois classes de matériaux : les zéolithes, les alumines et les argiles, matériaux de grand intérêt pour la transition énergétique. Si le laboratoire a connu des débuts compliqués dans un contexte de pandémie, à mi-parcours la dynamique de ses avancées s'est affirmée. Les travaux ont notamment porté sur de nombreux développements méthodologiques et l'acquisition de nouvelles données pour l'enrichissement des connaissances sur les milieux poreux et notamment leurs propriétés de transport. Le LCR Carmen, c'est également un esprit de partage scientifique et de rayonnement au sein d'une communauté. Ainsi, du 21 au 22 juin 2022 s'est tenu le workshop Carmen.EVOLUTION à l'initiative du LCR. Son objectif ? Définir collectivement les enjeux scientifiques et sociétaux du développement de nouveaux matériaux pour l'énergie ainsi que les orientations stratégiques pour y répondre. Pour en savoir plus, rendez-vous sur [www.ifpennergiesnouvelles.fr](http://www.ifpennergiesnouvelles.fr)



**Interview**  
**d'Anne Sinquin, ingénieure**  
**de recherche à IFPEN**



**FAIT MARQUANT**

**IFPEN prend part au GIS sur la quantification des incertitudes**

En octobre 2022, l'université Paris-Saclay (dont AgroParisTech, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, INRAE), CNRS et Inria ont lancé le groupement d'intérêt scientifique (GIS) LARTISSTE (Laboratoire de recherche en traitement des incertitudes par apprentissage statistique pour la sûreté, la conception et la transition énergétique). Dévolu à la quantification des incertitudes dans les simulations numériques, ce GIS fédère de nombreux chercheurs\*. La quantification des incertitudes intervient dans la modélisation des phénomènes physiques, chimiques, climatologiques, biologiques, etc. Dans ce cadre, IFPEN accueillera deux thèses, l'une avec CentraleSupélec sur la quantification d'incertitudes pour l'éolien et l'autre avec l'ONERA sur l'optimisation de systèmes couplés multiphysiques.

\* IFPEN, EDF, CEA, Framatome, CentraleSupélec, AgroParisTech, CNRS, INRAE, Inria, université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, université d'Évry, université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, ONERA, Safran, Airbus, Phimeca, Cerfacs, Clermont Auvergne INP et IRT SystemX.

**FAIT MARQUANT**

**IFPEN rejoint le DIM MaTerRE**

IFPEN rejoint le nouveau Domaine de recherche et d'innovation majeur (DIM) MaTerRE (MaTériaux avancés écoREsponsables) retenu par la région Île-de-France en 2022 et piloté par l'ESPCI Paris-PSL. Les DIM fédèrent des laboratoires de recherche mais aussi des entreprises sur des thématiques émergentes et à fort potentiel d'innovation. Le DIM MaTerRE concentre ses efforts sur quatre axes : la production, valorisation et gestion des gaz stratégiques (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) dans un objectif d'économie circulaire, les procédés de stockage et de récupération d'énergie efficaces et écologiques, la conception de matériaux de construction à faible impact environnemental et, enfin, l'exploitation des mines urbaines, le recyclage et l'éco-conception.

*Les journées annuelles du groupement de recherche (GdR) Hydrates de gaz, qui se sont déroulées en 2022 à IFPEN, ont réuni environ 70 experts qui ont échangé autour des hydrates et de leurs multiples propriétés. Ce GdR existe depuis 2018 et a été renouvelé fin 2022 pour prendre la forme d'un réseau thématique du CNRS. Il comporte une centaine de membres. La prochaine étape va consister à être plus visible au niveau européen. Les recherches sur les hydrates sont multiples. Dans le passé, le risque de blocage des conduites par les hydrates préoccupait les pétroliers et l'on cherchait à éviter leur formation. Aujourd'hui, les travaux de recherche concernent le risque hydrate lors de l'injection de CO<sub>2</sub> dans les réservoirs déplétés, le risque de relargage de méthane dans les fonds marins ou dans le permafrost, les procédés exploitant les hydrates pour purifier ou désaliniser l'eau, pour séparer des gaz, faire du froid, le transporter ou encore stocker de l'hydrogène. >>>*



## ILS ONT ÉTÉ RÉCOMPENSÉS EN 2022...



**Interview de  
Martina Torelli,  
lauréate du prix  
Yves-Chauvin 2022**

*Ma thèse a porté sur le méthane biogénique généré naturellement par des microorganismes dans les sédiments peu profonds. Ce gaz est une source d'énergie mais aussi un agent climatique s'il est émis dans l'atmosphère ou dans l'océan. L'évaluation des processus de genèse du gaz biogénique nécessite une compréhension de l'activité biologique à l'échelle microscopique et de l'évolution de la dégradation de la matière organique au fil du temps, combinée à la compréhension de l'évolution géologique à l'échelle d'un bassin sédimentaire. Ce travail a permis de démontrer que la modélisation de bassin est utile pour quantifier les émissions de gaz des fonds marins au cours des derniers millions d'années. Dans les zones étudiées, la marge passive d'Aquitaine et celles du Mozambique et de Madagascar autour du canal du Mozambique, le méthane est émis dans l'océan, mais la même approche s'applique au gaz biogénique issu des sédiments terrestres.*

## + FOCUS

**Pour accroître la recherche dans le domaine des aquifères karstiques**, l'ERC (European Research Council) a attribué en octobre 2022 une bourse Synergy à quatre coporteurs issus d'instituts de recherche européens dont Benoît Noetinger, chercheur IFPEN (voir page 8).



**Hélène Olivier-Bourbigou** reçoit le prix Codron-Fautz

Hélène Olivier-Bourbigou, coordinatrice du socle de recherche fondamentale d'IFPEN, s'est vu décerner la première édition du prix Codron-Fautz de l'Institut de France. Créé en 2021, ce prix annuel récompense, sur proposition de l'Académie des sciences, un(e) chercheur(se) ayant effectué un travail remarquable dans le domaine des sciences appliquées à la technologie. Il vient ici distinguer : d'une part, une démarche scientifique assurant un continuum entre recherche fondamentale dans le domaine de la catalyse homogène et applications industrielles ; d'autre part, les résultats de recherche sur la conception et la mise en œuvre de catalyseurs plus performants, pour une chimie plus durable et compétitive sur le plan économique.



**Bertrand Guichard**, ingénieur de recherche IFPEN, a reçu le **prix Innovation 2022** de la division Catalyse (DivCat) de la Société chimique de France (SCF) pour la mise au point de catalyseurs très performants dans le domaine du raffinage et pour l'étude du comportement en catalyse de formulations innovantes utilisées dans la production de carburants et biocarburants par coprocessing.



**Elsy El Hayek**, doctorante IFPEN (2017-2020), a reçu le prix de thèse Denise-Barthomeuf 2022 pour son travail sur les nouvelles zéolithes acides obtenues à partir de silicogermanates.



**Bassel Othman**, doctorant IFPEN (2018-2021), a reçu le prix de la chaire Sanef Abertis France, dans la catégorie Gestion des infrastructures de transport, pour sa thèse « Limitations de vitesse variables et contrôle d'accès dans un réseau routier urbain pour une meilleure durabilité environnementale ».

Plusieurs doctorants IFPEN se sont également distingués lors de conférences et à l'occasion de concours. Ainsi, **Thomas Pigeon** a obtenu le prix du meilleur poster lors de la conférence ICTAC (*International conference on theoretical aspects of catalysis*), et **Wassim Ammar**, celui de la meilleure présentation lors de la 11<sup>e</sup> édition des journées de l'AFA (Association française de l'adsorption). De même, **Beatriz Pereira Barata** a gagné un prix du CCDC (*Cambridge crystallographic data centre*) lors du 33<sup>e</sup> European crystallographic meeting, et **Loïc Dumortier** a été lauréat du ParAMS ReaxFF parametrization challenge, organisé par la société SCM (Software for chemistry & materials). Enfin, lors de la 24<sup>e</sup> conférence sur l'électronique de puissance et ses applications (EPE' 2022 ECCE Europe), **Alexandre Battiston**, ingénieur de la direction Mobilité et systèmes, a été récompensé pour le développement d'onduleurs à base de carbure de silicium de haute puissance et de haute tension.



# 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.**



## **ACCOMPAGNER SES SALARIÉS POUR SE RÉINVENTER**

IFPEN se diversifie dans les NTE en commençant par encourager la créativité et l'entrepreneuriat de ses propres salariés. En 2022, l'entreprise a continué de soutenir le développement des projets lauréats du dernier challenge interne. Qu'ils traitent du phénomène de retrait ou de gonflement des argiles qui engendrent des dégâts importants sur les bâtiments, ou permettent de produire par voie enzymatique un polymère de chitine pour des applications agroalimentaires ou médicales, ou apportent une solution pour filtrer les fibres microplastiques rejetées par les lave-linge par exemple. Ces projets sont le fruit d'une culture d'innovation permettant à IFPEN de se réinventer pour répondre aux exigences de la transition écologique. Grâce à un dispositif d'essaimage, IFPEN accompagne également ses salariés dans leur projet d'entreprise. En 2022, une salariée a été soutenue dans la création de So Sponge, une entreprise qui propose une solution de régulation de l'humidité dans les serres agricoles sans consommation d'énergie.



## **IFPEN MEMBRE DU RÉSEAU DEEPTANK DE BPI**

Lancé en 2019 par BPI France, le plan Deeptech vise à faire de la France un acteur majeur de l'innovation de rupture à l'échelle internationale. Ce plan a été doté de 3 milliards d'euros pour atteindre la création de 500 start-up deeptech par an d'ici 2025 et accompagner la croissance des leaders industriels de demain. L'objectif est d'atteindre 10 licornes d'ici 2025 et 100 sites industriels à l'horizon 2030. En complément, l'État a annoncé sa volonté de créer un fonds de 100 M€ pour soutenir en fonds propres les start-up dans leur développement.

Dans ce cadre, IFPEN et sa filiale IFP Investissements ont signé un partenariat avec BPI France en 2021. IFPEN participe ainsi à l'élaboration et la création d'outils facilitant le développement des start-up innovantes (plateforme de recherche d'associés, memorandum de collaboration pour faciliter les relations entre start-up et grands groupes...).





C'est dans le cadre du pôle de compétitivité Axelera que Soclema a pu entrer en contact avec IFPEN et développer une solution encore inexistante à ce jour, en phase avec son orientation vers les gaz renouvelables : l'odorisation du gaz à très faible débit. Outre les moyens techniques pour la validation de la technologie, IFPEN a apporté ses connaissances sur les fluides en répondant au cahier des charges au moyen de tests sur un banc d'essai en parfaite adéquation avec la demande. Le livrable nous a été particulièrement utile pour démontrer la faisabilité de la solution auprès de nos partenaires gaziers. IFPEN s'est également assuré que le système semi-industriel était parfaitement opérationnel et a accompagné le dépôt de brevets. GRTgaz, GRDF et Teréga ont accepté le prototype : les essais réalisés en conditions réelles dans leurs laboratoires, puis celui sur le terrain, ont été très concluants et ont débouché sur la commercialisation de la solution. >>

### Interview d'Olivier Pernot, CEO de Soclema



### Interview de Michel Thomas et Hélène Biguerd, ingénieur(e)s IFPEN



IFPEN a accompagné Agua de Sol pour le développement d'un nouveau type de panneau solaire dédié à la production d'eau potable : fixée la nuit par adsorption, la vapeur d'eau atmosphérique est désorbée la journée, puis condensée et récupérée pour être consommée. Le rayonnement solaire fournit l'énergie (chaleur et électricité) et permet la stérilisation. Nous sommes intervenus sur le projet en 2021 pour aider la PME à optimiser le choix du solide utilisé comme adsorbant. Nous avons sélectionné plusieurs solides de types alumines et zéolithes sur lesquels nous avons réalisé des tests portant sur leurs capacités d'adsorption d'eau et les températures caractéristiques de désorption afin de les comparer à la solution à base de silice utilisée par Agua de Sol dans la phase de développement de la technologie. L'adsorbant recommandé, à l'issue de la série d'essais comme alternative au gel de silice, sera testé en conditions réelles dans le panneau solaire par le partenaire. >>



## SOUTIEN AUX START-UP ET PME : LE RÉSEAU S'ÉLARGIT

IFPEN conduit depuis plus de trente-cinq ans une politique active de soutien aux PME et start-up qui portent des projets d'innovation. Ces projets sont en phase avec la triple transition écologique, énergétique et numérique. Pour identifier les opportunités de collaboration, IFPEN s'appuie sur un réseau étendu de partenaires – incubateurs ciblés, réseaux de soutien à l'innovation ou encore réseau des Carnot. Le soutien à l'innovation se traduit également par une participation à des fonds d'investissement spécialisés dans les éco-industries, les éco-énergies ou encore la mobilité durable qui investissent dans de jeunes start-up. En 2022, IFPEN a d'ailleurs souscrit au fonds d'amorçage industriel métropolitain (FAIM), fonds à impacts environnemental et social des métropoles de Lyon et de Saint-Étienne. À noter cette année : l'entreprise YLEC Consultants s'est tournée vers IFPEN pour être accompagnée dans l'obtention de la certification maritime internationale (IMO) pour sa technologie d'épurateur des eaux de cale de navires.



## DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE : IFPEN ACCOMPAGNE LE RISQUE DES ENTREPRISES INNOVANTES

IFPEN, initiateur de nouvelles technologies, porte ces innovations jusqu'au stade industriel en recherchant des partenaires, industriels, financeurs et porteurs de projet. Exemplaire de ce point de vue, l'année 2022 a constitué l'aboutissement d'une aventure collective de plus de dix ans : l'industrialisation du procédé BioTfuel®. IFPEN, Avril et BioNext se sont rapprochés d'Elyse Energy pour créer la société de projet BioTJet®, qui portera la première unité industrielle française de production de biokérosène avancé, à partir de biomasse durable (voir page 20). IFP Investissements et Axens sont entrés au capital de la société aux côtés d'Elyse Energy, d'Avril et BioNext pour accompagner l'étude et la construction de cette nouvelle usine.

## + FOCUS

En 2022, IFPEN a rencontré près de 300 entreprises.



## LE GROUPE POURSUIT SA TRANSITION

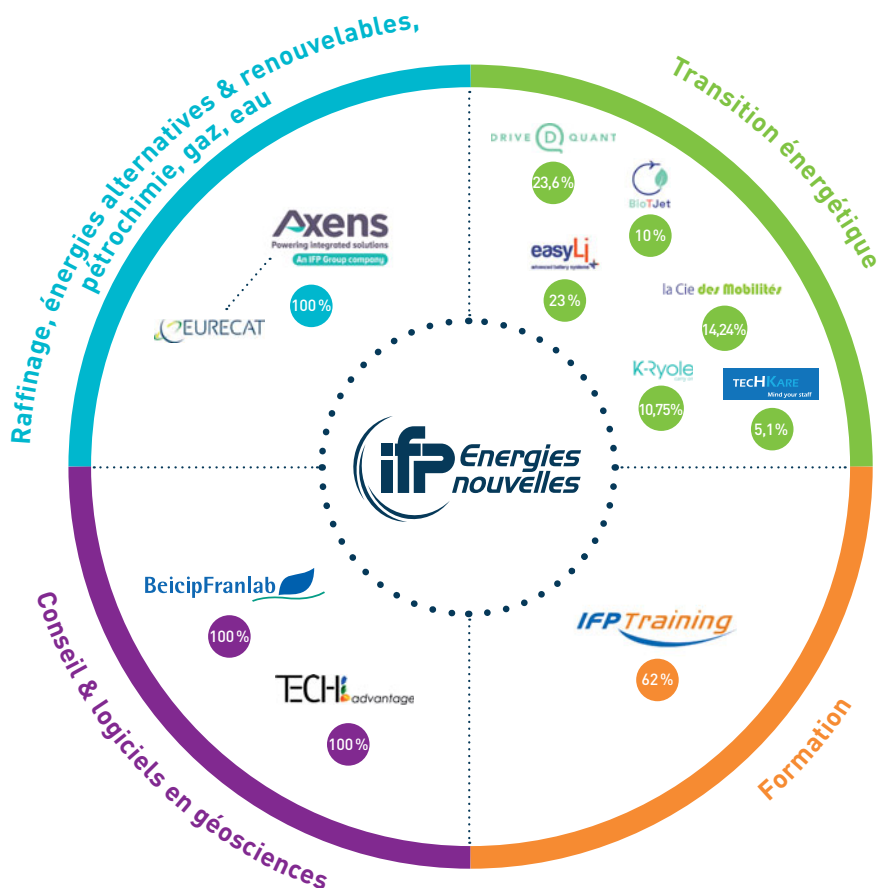
En 2022, hausse du chiffre d'affaires ou du carnet de commandes confirme la reprise, même si le niveau d'activité des principales filiales du groupe IFPEN – Axens, Beicip-Franlab et IFP Training – reste en retrait par rapport à ce qu'il était avant la crise sanitaire.

Les sociétés poursuivent leur diversification liée à la transition énergétique et environnementale. Le groupe Axens commence à industrialiser le procédé Rewind® Mix dans le domaine du recyclage des plastiques, signe de nombreuses licences dans le domaine des biocarburants d'aviation et fait l'acquisition de la société HydroThane,

qui propose des technologies dans le traitement de l'eau et la coproduction de biogaz. L'année est également marquée par un important travail des filiales sur leur plan de développement respectif à cinq ans incluant une réflexion sur les relais de croissance de demain en ligne avec la transition énergétique, environnementale et numérique.

## PORTEFEUILLE DES PARTICIPATIONS INDUSTRIELLES\*

\* Au 31 décembre 2022



## COMPTES CONSOLIDÉS DU GROUPE IFPEN EN 2022

**968,3 M€**  
Chiffre d'affaires

**43,5 M€**  
Résultat d'exploitation

**30,3 M€**  
Résultat net part du groupe



# FORMER LES TALENTS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

IFP School, école d'application et CFA, prépare ses élèves à être acteurs de la transition énergétique. L'enjeu est double : répondre aux besoins de l'industrie et aux attentes de la société en proposant des formations d'excellence dans les domaines de l'énergie et de la mobilité durable, basées sur une pédagogie innovante. Elle s'appuie également sur un écosystème de partenaires académiques et industriels en France et à l'international, des activités de recherche et une démarche engagée de responsabilité sociétale.



## UNE OFFRE ADAPTÉE AUX BESOINS INDUSTRIELS ET SOCIÉTAUX

IFP School prépare de nouvelles générations de talents à piloter les évolutions des secteurs de l'énergie et de la mobilité pour construire un monde décarboné. Ainsi, les dix programmes menant à des diplômes d'ingénieur spécialisé sont adaptés en continu et la part des enseignements dédiés aux NTE est en constante augmentation. À titre d'exemple, une option consacrée à la chaîne de valeur de l'hydrogène est aujourd'hui enseignée dans les programmes des quatre domaines couverts : Motorisations et mobilité durable, Économie et management de l'énergie, Procédés pour l'énergie et la chimie, Géoressources et énergie. La reconnaissance de la qualité des enseignements et de leur adéquation aux besoins des entreprises s'est notamment traduite par le renouvellement,

en 2022, de la labellisation du Mastère Spécialisé® Groupes motopropulseurs et par la signature d'un partenariat avec l'université de Strasbourg pour l'ouverture prochaine d'un master dans le domaine des géoressources.

En outre, élèves et doctorants ont été récompensés : un doctorant de la chaire ECAV a été élu meilleur jeune auteur lors de la 10<sup>e</sup> conférence de l'*International federation of automatic control* ; des équipes du programme *Powertrain Engineering* ont remporté les premier et deuxième prix du meilleur poster étudiant lors du congrès *Powertrain & Energy* de la Société des ingénieurs de l'automobile (SIA) ; un élève du programme *Energy technology economics and management* a été l'un des huit jeunes diplômés élus *Energy leaders for tomorrow* ; une équipe est arrivée deuxième de la finale du *Laurie Dake Challenge* de l'*European association of geoscientists and engineers* (EAGE) ; une équipe a remporté la finale du *Minus CO<sub>2</sub> challenge* également organisé par l'EAGE.

D'autre part, l'École valorise l'engagement associatif, social ou professionnel des étudiants en prenant en compte les compétences et savoir-faire acquis dans la validation du cursus. Elle valorise également les initiatives prises en son sein, à l'instar du club Initiatives pour un campus durable.

Reflète de la diversité de la société, l'École s'implique en termes d'égalité pour favoriser l'augmentation du nombre de jeunes femmes (31 % de la promotion 2022), et d'insertion de personnes en situation de handicap avec, par exemple, une participation active aux journées Duoday. Parallèlement, des actions sont menées tant sur le campus pour limiter son impact environnemental et favoriser les comportements éco-responsables, qu'au sein du réseau des écoles supérieures du développement durable (RESDD) pour mutualiser les bonnes pratiques en matière d'enseignements liés au développement durable.

## + FOCUS

IFP School, qui a pour ambition de bâtir une école exemplaire intégrant les préoccupations sociétales, économiques et environnementales actuelles, se classe ainsi à la quatrième place du palmarès des écoles d'ingénieurs les plus engagées sur les enjeux de responsabilité sociétale dans le classement spécial RSE du label HappyIndex@AtSchool.



### Interview de

**Sidney Lambert-Lalitte,**  
responsable du  
programme **Energy  
technology economics  
and management**  
et coordonnateur  
du club **Initiatives  
pour un campus durable**



*Dans le cadre de sa démarche RSO, l'École s'appuie bien sûr sur l'expertise d'un référent chargé de son déploiement en synergie avec la politique IFPEN. Elle s'appuie également sur les initiatives impulsées par le personnel d'IFP School et par les élèves qui font partie d'une génération qui se préoccupe du développement durable au quotidien.*

*À travers le groupe Initiatives pour un campus durable, créé en 2018 et dont je suis le coordonnateur, nous travaillons collectivement à réaliser des actions concrètes afin de faire vivre le développement durable sur le campus. Parmi les initiatives menées à bien : une campagne de sensibilisation aux écogestes, la rédaction d'un guide du développement durable proposant des solutions locales applicables au quotidien, la distribution de gourdes réutilisables pour réduire l'usage du plastique sur le site de l'École. J'accompagne les élèves dans leurs initiatives et sur des aspects organisationnels ou budgétaires.*

*Je suis également garant de la continuité de leurs actions auprès des promotions suivantes. Pour renforcer ce lien, les étudiants ont d'ailleurs souhaité constituer une section dédiée au développement durable au sein du bureau des élèves. Ses membres ont notamment mené une campagne de collecte de vêtements qui a permis d'en donner 60 kilos à un centre Emmaüs. Initiatives pour un campus durable soutient ainsi la mise en œuvre de nombreuses petites actions, locales, concrètes et utiles.*

*Les initiatives à plus long terme ne sont pas oubliées ! Elles sont présentées à la direction de l'École qui pourra les mettre en œuvre et les pérenniser. Je pense par exemple aux propositions concernant la diminution de l'empreinte carbone du transport des intervenants et des élèves se rendant sur le lieu de stage.*

*Le développement durable est vraiment entré au cœur du quotidien d'IFP School. »»*



## UNE PÉDAGOGIE QUI SE RÉINVENTE EN CONTINU



IFP School propose une offre de formation basée sur une pédagogie innovante et agile qui met en avant l'expérimentation pour une meilleure acquisition des connaissances. Cas réels, serious games, réalité virtuelle, utilisation de logiciels industriels... les dispositifs innovants de formation peuvent également offrir une alternative pour pallier les problèmes de sécurité ou d'autorisation d'accès à des composants et à des installations. Si les élèves réalisent de nombreux stages terrain, les outils numériques et la digitalisation des formations permettent d'aller plus loin dans la découverte des environnements professionnels ou dans l'apprentissage des gestes métier. L'école s'appuie sur les réalisations du LAB e-NOV™, son laboratoire des cultures digitales. En 2022, l'équipe a accompagné la conception d'un module sur l'hydrogène et la mobilité et a décliné un Mooc sur la transition énergétique en une web-série. Toujours à la pointe de l'innovation pédagogique, le LAB e-NOV™ s'est doté d'un studio d'impression 3D.



## FAIT MARQUANT


**Le label de l'excellence numérique  
4Digital décerné à IFP School**

La Conférence des grandes écoles (CGE) a décerné le label 4Digital à l'École, une reconnaissance de sa maîtrise du numérique au service de la pédagogie et de l'enseignement à distance. Ces dernières années, la digitalisation d'IFP School s'est accélérée grâce à l'engagement des enseignants, des équipes du LAB e-NOV™ et de SMILE (service multimédia informatique et logistique de l'École) et aux investissements matériels réalisés. Ce label va permettre à l'École de dispenser une partie des enseignements de ses Mastères spécialisés® en distanciel et d'en développer de nouveaux dans ce format hybride.


**UNE STRATÉGIE DE  
DÉVELOPPEMENT RÉUSSIE**

En 2022, les opérations d'essai menées par IFP School en partenariat avec IFP Training se sont poursuivies avec succès et plusieurs programmes ont été reconduits : 20<sup>e</sup> édition du master *Petroleum engineering and project development*, au Nigeria ; troisième promotion des masters *Petroleum Upstream techniques & economics* et *Petroleum Downstream techniques & economics* en Côte d'Ivoire ; deuxième session du master spécialisé Ingénierie pétrolière et gazière au Sénégal.

D'autre part, la stratégie de développement de l'École a permis de nouer de nouveaux partenariats avec des entreprises positionnées sur les marchés de la transition énergétique. Les activités de recherche conduites à IFP School contribuent également à son rayonnement à travers la publication d'articles scientifiques et de communication à congrès. Ceux-ci relaient notamment les travaux menés au sein des quatre chaires d'enseignement portées par l'École : *Electricity and digital transition* (EDT), *Electric, Connected and autonomous vehicles for smart mobility* (ECAV), *Electrolyte thermodynamics* (EleTher) et *Carbon management and negative CO<sub>2</sub> emissions technologies towards a low carbon future* (CarMa). Citons, à titre d'illustration, la participation de l'équipe de recherche CarMa à la 16<sup>e</sup> édition du congrès *Greenhouse gas control technologies* (voir page 7). Trois conventions ont également été signées dans le cadre de cette chaire. L'une, avec le Massachusetts Institute of Technology (MIT), concerne un contrat de recherche subventionné pour un postdoctorat et les deux autres, avec le CNRS et avec INRAE-AgroParisTech, ont pour objet des thèses. Une première thèse, depuis le lancement de la chaire en 2019, a d'ailleurs été soutenue fin 2022.

Un important réseau d'alumni concourt au rayonnement d'IFP School. Ses membres participent, entre autres, aux webinaires mensuels IFP School Voices qui ont notamment récemment abordé le rôle des biocarburants dans la décarbonation des transports, la compétitivité de l'hydrogène vert, les nouveaux défis pour les systèmes électriques, les jumeaux numériques ou les carburants aéronautiques durables ; des thématiques qui reflètent la volonté de l'École de contribuer à apporter des réponses aux grands enjeux énergétiques, environnementaux, sociétaux et économiques du XXI<sup>e</sup> siècle.

## FAIT MARQUANT

**Une plongée au cœur des défis de la  
transition énergétique et des innovations  
pour un avenir bas carbone**

Début 2022, IFP School a lancé deux modules de formation en ligne conçus avec l'appui du LAB e-NOV™ par les équipes enseignantes en collaboration avec des chercheurs IFPEN. Le premier, *Transition énergétique*, issu du Mooc *Energy transition for a low-carbon future*, contenait une sélection de capsules vidéo et de jeux. Le deuxième module, *Hydrogen for mobility*, proposait de découvrir les technologies hydrogène appliquées à la mobilité lourde à travers des capsules vidéo réparties en trois séquences : modes de production de l'H<sub>2</sub>, moteurs à combustion interne à hydrogène et véhicules à pile à combustible. Ces modules, qui ont réuni au total plus de 5 000 participants, étaient suivis de webinaires leur donnant l'occasion d'approfondir les concepts et d'interagir avec les équipes référentes.





## CONSEIL DE PERFECTIONNEMENT

au 1<sup>er</sup> décembre 2022

### 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

#### Stéphane Martinot

Valeo Powertrain Systems, directeur Marketing produit

#### Bruno Covin

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

#### Olivier Peyret

Schlumberger France, président-directeur général

#### Marie-Isabelle Filliette

TotalEnergies, chef de département – Direction Stratégie et politique RH

#### Sandra Roche-Vu Quang

Elengy, directrice générale

#### Philippe Franza

ExxonMobil, directeur des Ressources humaines

#### 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](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr)

Retrouvez IFPEN et IFP School sur les réseaux sociaux



• **Rédaction:** IFPEN • **Conception-réalisation:** **WWT** - [www.wwttogether.fr](http://www.wwttogether.fr) – 2303\_04319  
• **Impression :** papier issu de forêts gérées durablement.  
• **Crédits photos et illustrations :** Adobe Stock ; IFPEN ; Laurent Wargon - Objectif Images ; Sabine Serrad - Objectif Images ; Alys Thomas.  
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](http://WWW.IFPENERGIESNOUVELLES.FR)

+