

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022

# CARNOT

## IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES



Pages

# SOMMAIRE

03

**LE MOT DU DIRECTEUR**

04

**IFP ENERGIES NOUVELLES**

05

**LE CARNOT IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES EN BREF**

06

**ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE**

- CARBONE ET POLLUTION PLASTIQUE DANS LES SOLS : LE CARNOT IFPEN RE SE MOBILISE
- LE CARNOT IFPEN RE LEADER DES TECHNOLOGIES DE CAPTAGE DE CO<sub>2</sub>
- RÉPONDRE AUX DÉFIS DE L'ÉOLIEN GRÂCE À LA DIGITALISATION
- LA GÉOTHERMIE : UN ATOUT POUR RÉDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES CHAMPS PÉTROLIERS
- DÉVELOPPEMENT DES SYSTÈMES DE STOCKAGE ET GESTION DE L'ÉNERGIE
- HYDROGÈNE ET MAÎTRISE DES RISQUES

12

**GRAND ANGLE :**

- FLAIR SUITE : AU SERVICE DE LA SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE ET INDUSTRIELLE DES GAZ

14

**ACTIONS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET DE PROFESSIONNALISATION**

17

**SALONS ET MANIFESTATIONS**

## LE MOT DU DIRECTEUR



Je suis très fier de prendre en 2023 la suite d'Eric Heintzé (à qui je souhaite une belle route à la tête de l'établissement IIFPEN-Lyon) comme directeur du Carnot IFPEN Ressources Energétiques.

Parmi les évènements qui ont marqué l'année 2022, je souhaiterais souligner le renforcement de l'alliance des Carnot pour les énergies à faible impact carbone, dont nous sommes cofondateurs avec les Carnot Énergies du futur, ISIFOR, ICÉEL et M.I.N.E.S.

Portés par la force du réseau, nous avons l'ambition commune d'adapter et de déployer l'offre de recherche des Carnot impliqués sur les énergies à faible impact carbone pour renforcer les liens avec les industriels, notamment les PME et ETI, dans la perspective de transferts technologiques et d'une compétitivité accrue des acteurs français.

Après un séminaire en mars pour que les équipes fassent connaissance et pour ébaucher une feuille de route, une première réalisation concrète a été l'organisation conjointe des rencontres EcoTechEnergies en décembre. Des *workshops* thématiques internes à l'alliance ont également été organisés pour démultiplier les échanges entre les chercheurs des cinq Carnot et favoriser l'émergence d'opportunités communes.

Dans ce rapport annuel, outre un panorama des actions les plus représentatives et de notre engagement collaboratif, vous trouverez un « Grand angle » sur la Flair suite, panel d'outils développés par notre Carnot au service de la surveillance environnementale et industrielle des gaz (voir page 12). Retrouvez également un point sur les actions de ressourcement scientifique et de professionnalisation que l'abondement Carnot permet d'accélérer (voir page 14).

Bonne lecture !

**Benjamin Herzhaft**

Directeur du Carnot IFPEN Ressources Energétiques

# IFP ENERGIES NOUVELLES



IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. Depuis les concepts scientifiques en recherche fondamentale jusqu'aux solutions technologiques en recherche appliquée, l'innovation est au cœur de son action, articulée autour de quatre orientations stratégiques : climat, environnement et économie circulaire – énergies renouvelables – mobilité durable – hydrocarbures responsables.

Dans le cadre de la mission d'intérêt général confiée par les pouvoirs publics, IFPEN concentre ses efforts sur l'apport de solutions aux défis sociétaux et industriels de l'énergie et du climat, au service de la transition écologique. Partie intégrante d'IFPEN, IFP School, son école d'ingénieurs, prépare les générations futures à relever ces défis.

## UNE RECHERCHE CENTRÉE SUR L'INNOVATION

Les programmes de R&I d'IFPEN ont pour objectif de lever des verrous scientifiques et technologiques afin de déboucher sur des innovations valorisables par l'industrie.

Face à une large gamme de questionnements scientifiques ouverts, la recherche fondamentale d'IFPEN vise à produire un socle transverse de connaissances nouvelles, de concepts et méthodologies, support au développement des innovations de demain.

Les projets sont souvent menés dans un cadre collaboratif avec des partenaires académiques et industriels.

Les chercheurs d'IFPEN apportent régulièrement leur expertise scientifique aux pouvoirs publics, afin de leur fournir des éléments d'éclairage utiles à la décision. Engagé dans de nombreux projets, plateformes technologiques et réseaux dans le cadre d'Horizon Europe, IFPEN contribue également à faire émerger une vision européenne de la recherche dans les domaines de la mobilité, de l'énergie et de l'environnement.

Les programmes de recherche appliquée sont structurés autour des quatre orientations stratégiques :

- climat, environnement et économie circulaire : réduire l'impact des activités humaines et industrielles sur le climat et l'environnement ;
- énergies renouvelables : produire, à partir de sources renouvelables, de l'énergie, des carburants et des intermédiaires chimiques ;
- mobilité durable : développer des solutions pour des transports efficaces et à faible impact environnemental ;
- hydrocarbures responsables : répondre à la demande en énergie et en produits chimiques de manière plus respectueuse de l'environnement.

## UN FINANCEMENT PUBLIC/PRIVÉ

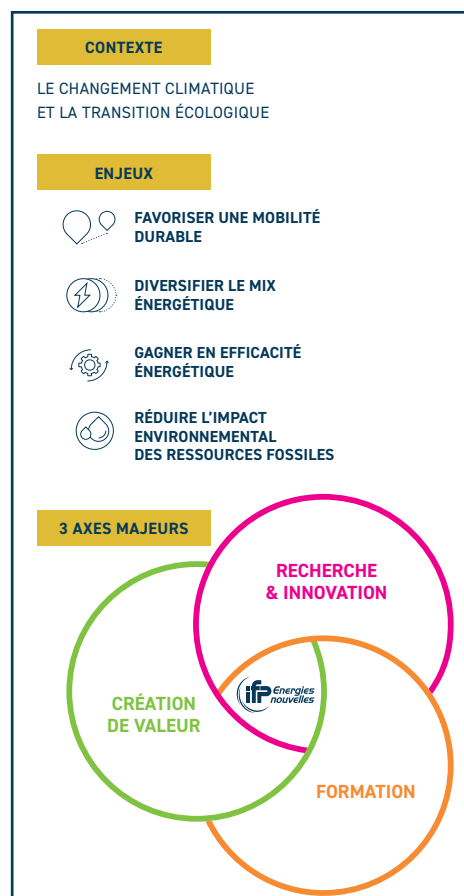
Le financement d'IFPEN est assuré à la fois par le budget de l'État et par des ressources propres provenant de partenaires industriels.

## LA CRÉATION DE VALEUR

IFPEN contribue à la création de richesse et d'emplois, en soutenant la compétitivité des acteurs industriels et en favorisant le développement économique des filières liées aux secteurs de la mobilité, de l'énergie, de l'environnement et des éco-industries. Le modèle d'IFPEN repose sur la valorisation industrielle des technologies développées par ses chercheurs. La mise sur le marché des innovations se fait au travers de partenariats étroits avec des industriels et via les filiales de son groupe. Sur des marchés émergents ou matures, IFPEN crée ainsi des sociétés ou prend des participations dans des entreprises prometteuses. Par ailleurs, IFPEN accompagne le développement de start-up et PME dans le cadre d'accords de collaboration leur permettant de bénéficier de son savoir-faire technique et juridique.

## LA FORMATION VECTEUR DE COMPÉTITIVITÉ

Dans le contexte de la transition énergétique, IFP School forme des talents pour relever les défis techniques, économiques et environnementaux, tout en accompagnant les industriels dans leurs besoins en personnel hautement qualifié. Rayonnant à l'international, IFP School propose à de jeunes diplômés des formations de niveau Master pour les métiers d'aujourd'hui et de demain dans les domaines de l'énergie, de l'automobile et de l'environnement. Elle décerne ainsi un diplôme tous les ans à plus de 500 étudiants issus du monde entier.



# LE CARNOT IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES EN BREF



Le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques (RE) est un acteur majeur de la triple transition énergétique, écologique et numérique. Il propose à ses partenaires industriels des solutions innovantes afin de développer des énergies renouvelables compétitives, de minimiser l'impact climatique des activités industrielles et réduire l'impact environnemental lié à la production des énergies fossiles dans cette période de transition. Il s'appuie notamment pour cela sur les nouvelles opportunités du digital.

Le Carnot IFPEN RE relève les défis de la triple transition énergétique, écologique et numérique :

## Développer les énergies renouvelables

- Optimiser la production dans l'éolien et la géothermie, transporter et stocker l'hydrogène
- Intégrer les renouvelables dans le réseau d'électricité via le stockage et les systèmes de management de l'énergie (EMS)
- Gérer le sous-sol pour la transition énergétique

## Minimiser l'impact climatique des activités industrielles

- Valoriser le captage, stockage et valorisation du CO<sub>2</sub> (ou CCUS en anglais)
- Surveiller les sites industriels : détecter les fuites de gaz, remonter à l'origine
- Comprendre le rôle des sols en tant que puits de carbone
- Gérer et traiter la ressource en eau
- Caractériser les microplastiques dans l'environnement

## Minimiser l'impact environnemental lié à la production des énergies fossiles

- Caractériser et gérer les réservoirs pétroliers de manière plus écoresponsable
- Minimiser les risques liés à l'exploration, au forage et à la production

## Saisir les opportunités offertes par le digital

- Développer de nouveaux produits, services ou business models via l'accompagnement des industriels dans leur transformation digitale,
- Mettre en place des actions de sciences participatives

## Le Carnot IFPEN RESSOURCES ENERGETIQUES en 2022, c'est :

14 laboratoires de recherche représentant 421 ETP dont 46 doctorants et post-doctorants

76 contrats de recherche contractuelle dont environ 50 % à l'international

28 contrats actifs de licences de technologies dont 23 avec des ETI/PME/TPE

36 projets de recherche collaborative auxquels contribuent 58 entreprises partenaires

19 brevets déposés dans l'année et 1213 détenus dans le portefeuille de brevets

63 publications de rang A

## ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE



### Carbone et pollution plastique dans les sols : le Carnot IFPEN RE se mobilise

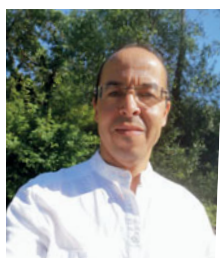
Conscient des enjeux climatiques que représentent les sols, qu'il s'agisse de la pollution ou de la question du stockage du carbone, le Carnot IFPEN RE a noué de nombreuses collaborations scientifiques en 2022 sur ces thématiques. Coordonné par l'Institut de recherche pour le développement (IRD, Eco&Sols, Montpellier) et mené en partenariat avec le Carnot IFPEN RE, 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, le Carnot IFPEN RE a en outre démarré deux nouveaux projets : e-DIP et Plastisol (voir ci-contre).



#### 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 le Carnot IFPEN RE 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 du Carnot IFPEN RE 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 le Carnot IFPEN RE 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.*



#### 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.

## ZOOM PROJETS COLLABORATIFS

Dans le cadre d'une volonté de fédérer les efforts de recherche sur la pollution plastique des sols, l'ANR et l'ADEME ont engagé deux projets auxquels le Carnot IFPEN RE participe : e-DIP et Plastisol.

Du côté d'**e-DIP** le Carnot IFPEN RE est co-responsable des travaux concernant l'effet des microplastiques sur la matière organique du sol. L'objectif est d'étudier l'impact direct ou indirect des microplastiques sur la qualité de la matière organique des sols en utilisant la méthode Rock-Eval® développée par IFPEN. Le projet **Plastisol** vient en appui du projet e-DIP. Les équipes du Carnot IFPEN RE participent notamment aux travaux concernant la détection et la caractérisation des microplastiques qui sont mélangés aux déchets organiques et se retrouvent in fine dans les sols.

Par ailleurs, le Carnot IFPEN RE participe au projet international **VULCAR-FATE** (*Global change impact on vulnerable carbon reservoirs: carbon sequestration and emissions in soils and waters From the Arctic To the Equator*). Financé par l'ANR, la *National Science Foundation* et la *Russian Foundation for Basic Research*, et coordonné par l'IRD, il étudie deux écosystèmes et y évalue l'impact des changements climatiques récents et des usages des sols.

**Objectif** : définir des scénarios d'évolution à 30-100 ans afin d'adapter les politiques locales.

Voir les conventions de subvention des projets H2020 page 18

## Le Carnot IFPEN RE 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>, le Carnot IFPEN RE 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 le Carnot 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 avec 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.

### Fait marquant

### 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, le Carnot IFPEN RE a coorganisé à Lyon, 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.





## ZOOM PROJETS COLLABORATIFS

Le Carnot IFPEN RE est fortement impliqué dans les réseaux européens de recherche et de développement dans le domaine du CCUS. Il travaille en étroite collaboration avec plusieurs organismes européens et est impliqué dans de nombreux projets collaboratifs avec soutiens publics.

Membre de la Plateforme européenne de technologie et d'innovation **Zero Emissions Platform (ZEP)**, le Carnot IFPEN RE participe aux préconisations sur le déploiement du CCUS dans l'Union Européenne. Il est également impliqué dans **CO<sub>2</sub> ValueEurope**, une association européenne dédiée à la conversion et à la valorisation du CO<sub>2</sub> et membre de **CO<sub>2</sub> GeoNet**, un organisme scientifique européen sur le stockage géologique du CO<sub>2</sub> et d'**ECCSEL**, le réseau de recherche européen dans le domaine du CCUS. Il participe à plusieurs projets de recherche parmi lesquels le projet **ADEME dinamX**, démonstration sur un pilote industriel du procédé DMX™ pour la décarbonation du gaz de haut-fourneau.

Le Carnot IFPEN RE participe également à plusieurs projets financés par le programme H2020 de l'Union européenne, tels que **Sun2Chem**, qui vise à développer des solutions pour une réduction efficace des émissions de CO<sub>2</sub> grâce à l'énergie solaire et **STRATEGY CCUS**, qui étudie plusieurs régions européennes pour évaluer leurs capacités en matière de CCUS. **PilotSTRATEGY**, prolongement du projet STRATEGY CCUS, vise quant à lui à caractériser cinq régions en Europe comme zones potentielles de stockage géologique de CO<sub>2</sub>. Les travaux du Carnot concernent le site pilote français localisé dans le Bassin parisien. Enfin dans le cadre de **REX-CO<sub>2</sub>**, les équipes du Carnot IFPEN RE ont contribué à élaborer 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>.

Les équipes sont également impliquées dans des projets de démonstration industrielle qu'elles pilotent, tels que **3D (DMX™ Demonstration in Dunkirk)**, qui a pour objectif démontrer la faisabilité de la décarbonation du gaz de haut-fourneau sur le site sidérurgique d'ArcelorMittal à Dunkerque, et **SENSE**, qui vise à développer des techniques de télédétection rapide adaptées aux spécificités des sites de stockage de CO<sub>2</sub>. Le Carnot IFPEN RE participe également avec 17 partenaires européens à **SECURE**, qui vise à tester et à améliorer les technologies de surveillance en continu des sites de stockage de CO<sub>2</sub> et prend part au projet **Cheers**, qui met en place une technologie innovante de combustion en boucle chimique permettant de capturer plus efficacement et à moindre coût les émissions industrielles de CO<sub>2</sub>. Enfin, le Carnot IFPEN RE participe à **ECCSELERATE**, un projet visant à promouvoir l'utilisation et à assurer le fonctionnement durable à long terme d'ECCSEL, l'infrastructure de recherche européenne dédiée au CCUS.

*Voir les conventions de subvention des projets H2020 page 18*



## Répondre aux défis de l'éolien grâce à la digitalisation

Le Carnot IFPEN 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 du Carnot IFPEN RE 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 Energie 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. Le Carnot IFPEN RE 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.

## ZOOM PROJETS COLLABORATIFS

Engagé dans plusieurs réseaux européens de recherche sur l'éolien, le Carnot IFPEN RE fait partie de **WECANet**, un réseau paneuropéen qui se concentre sur l'énergie houlomotrice. Il est également membre d'**EOCOE** (*European Energy Research Alliance Joint Programme on Energy*), centre d'excellence dédié à l'énergie. Au sein d'EOCOE, il vise à relever, par l'usage du calcul haute performance (HPC), les défis scientifiques en termes de modélisation et de conception dans cinq secteurs clés pour la transition énergétique. De plus, Le Carnot IFPEN RE participe à plusieurs projets européens axés sur l'énergie éolienne comme **HIPERWIND** (*Highly advanced Probabilistic design and Enhanced Reliability methods for high-value, cost-efficient offshore WIND*) qui vise à réduire significativement le coût des éoliennes marines en améliorant la précision des modèles numériques.

Voir les conventions de subvention des projets H2020 page 18

## 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, une étude a été menée avec Beicip-Franlab 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.



### ZOOM PROJETS COLLABORATIFS

Le Carnot IFPEN RE s'implique également dans les plateformes et projets européens liés à la recherche sur la géothermie. Il participe ainsi à la plateforme *European Technology & Innovation Platform on Deep Geothermal (ETIP-DG)*, qui a pour but de favoriser le développement de la technologie géothermique profonde en Europe. Il collabore à quatre projets européens visant à développer et améliorer la technologie géothermique.

**DEEPEN**, coordonné par Reykjavik Energy, se concentre sur le développement de la géothermie en contexte magmatique et la maîtrise des risques associés. Les équipes du Carnot contribuent au projet en développant une méthodologie pour évaluer le risque de dépôts minéraux dans les puits de production. Quant au projet **H2020 Geco**, il ambitionne de réduire les émissions de gaz non condensables des centrales géothermiques grâce au développement de technologies innovantes testées sur quatre centrales pilotes en Europe.

#### 2 nouveaux projets en 2022

En octobre 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.

En fin d'année, démarrait le **projet Gliter**, financé par l'ANR en partenariat avec le BRGM et Lithium de France. Il porte sur l'évaluation du potentiel de coproduction géothermie et lithium du fossé rhénan.

*Voir les conventions de subvention des projets H2020 page 18*



### Hydrogène et maîtrise des risques

Dans le domaine de l'hydrogène, en parallèle des travaux liés à la mobilité, 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) ».



## 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 le Carnot IFPEN 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, le Carnot 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 souhaitions démarcher sur le sujet du CAES. Une première étape importante pour Geostock dans la perspective de réaliser un pilote industriel.*



### 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.

# Flair suite : au service de la surveillance environnementale et industrielle des gaz

La qualité de l'air est aujourd'hui une préoccupation majeure en matière de santé publique. Au-delà de la réduction des émissions de polluants, il est nécessaire de surveiller l'évolution globale de la composition chimique de l'atmosphère, notamment sur ou aux abords des sites industriels. Compte tenu des enjeux économiques et de sécurité associés, la surveillance des émissions de gaz à grande échelle est également importante.

Dans ce contexte, les équipes du Carnot IFPEN RE ont développé le projet Flair Suite. La Flair Suite regroupe un ensemble de solutions technologiques connectées, fixes ou mobiles destiné à la surveillance de l'air en temps réel, l'analyse des sources d'émissions, la prévision des concentrations de polluants et la mesure de l'efficacité des mesures prises pour améliorer la qualité de l'air.

En permettant l'analyse des gaz de l'air ou du sol en temps réel, la Flair Suite couvre une large palette de besoins tels que :

- Détection de fuite et identification de la source ( $\text{CO}_2$  /  $\text{CH}_4$  /  $\text{C}_2\text{H}_6$  / THT)
- Mesure de la qualité de l'air, dont molécules odorantes (molécules soufrées et ammoniacuées, molécules agricoles phytosanitaires)
- Mesure de la respiration du sol
- Présence de gaz à effet de serre



### Flair car : station mobile d'analyse multigaz de l'air et du sol

Flair car embarque des capteurs et analyseurs gaz tels que l'analyseur Picarro (mesure par lasers infrarouges de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ , vapeur d'eau, isotope du carbone 13) afin de réaliser des mesures en temps réel. Une station GPS permet la géolocalisation des données et une station météo enregistre les informations relatives au vent, afin de pouvoir modéliser les panaches. L'objectif des développements est de permettre à Flair car de détecter les anomalies de composition de l'air au sol et dans l'air ambiant et de remonter à la source de ces émissions.



### Flair box : station autonome mobile d'analyse multigaz de l'air

Flair box permet d'analyser, par spectrométrie UV à de très faibles teneurs, une large gamme de molécules, telles que THT (tétrahydrothiophène, odorant ajouté dans le gaz naturel), molécules soufrées ( $\text{SO}_2$ , etc), ammoniacuées, azotées, etc. Flair box peut être embarquée dans Flair car pour des mesures mobiles ou installée sur site pour des mesures sur le long terme.



### Flair soil : station fixe d'analyse multigaz du sol et du sous-sol

Flair soil se prête à un large éventail d'applications, telles que détection de fuites de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  et THT), comportement du gaz en milieu fermé, étude de la respiration du sol à différentes profondeurs, présence de molécules phytosanitaires soufrées et ammoniacuées dans les sols agricoles.



### Flair lab : laboratoire gaz pour études complémentaires

Flair lab est constitué d'un vaste parc analytique (analyse compositionnelle, ligne de récupération, isotopie, gaz rares, calibration de nouvelles molécules) qui complète les analyses réalisées sur le terrain. Flair lab permet également de développer de nouvelles méthodes et capteurs dédiés à la géothermie et à l'hydrogène et aux molécules odorantes.



### Flair map : appli web interactive de traitement des données

Flair map, conçu comme étant le cerveau de la FlairSuite, capitalise les informations issues des différents outils. Grâce à la technologie xDash développée par IFPEN, Flair map restitue les données de manière ludique et pratique.

Les chercheurs travaillent aujourd'hui à enrichir Flair avec de nouvelles fonctionnalités sensorielles qui viendront compléter les stations de surveillance de gaz. Ainsi, le traitement des images issues des caméras embarquées sur les stations de monitoring (fixes et mobiles) étoffera les cartographies des concentrations de gaz : un algorithme permettra d'afficher en photo l'environnement à 360 ° lors d'une mesure anormale de gaz. De même, l'étude des fréquences sonores autour des stations de monitoring sera couplée au jeu de données atmosphériques, afin de caractériser les anomalies de gaz enregistrées (bruit de fuite, passage de véhicules, etc.).

Enfin, pour des raisons d'accessibilité des sites à étudier, les stations de monitoring doivent pouvoir être embarquées sur différents modes de locomotion : à pied, en voiture, en drone, à vélo, etc. Un effort technologique est en cours afin de réduire la taille et le poids des stations.



Dans le cadre du projet européen GECO qui vise, à partir d'un pilote expérimental de Reykjavik Energy en Islande, à réduire drastiquement les émissions de gaz des centrales géothermiques, l'équipe Flair s'est déplacée pour réaliser des mesures de qualité de l'air et également d'impact sonore autour des sites géothermiques. Cette mission a permis d'expérimenter le modèle sac à dos de la solution Flair de surveillance environnementale qui, en réduisant en taille et en poids la Flair box™, rend possible l'exploration de zones inaccessibles en voiture.

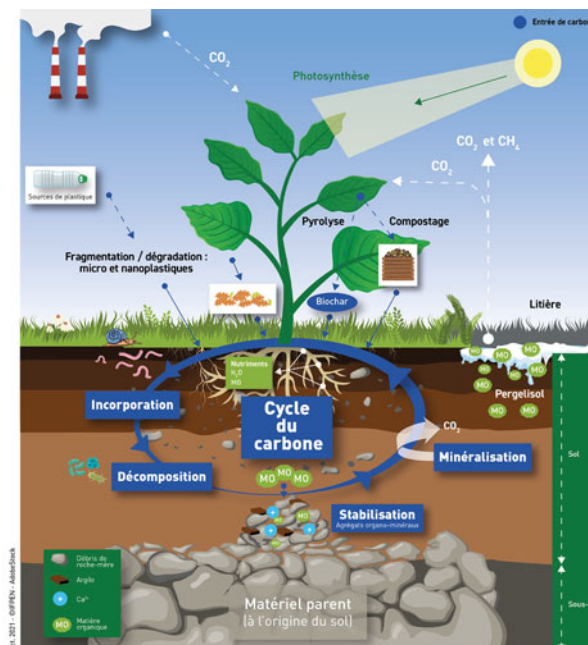


## ACTIONS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET DE PROFESSIONNALISATION

L'abondement Carnot offre au Carnot IFPEN Ressources Énergétiques l'opportunité d'accélérer le développement de ses compétences et de renforcer ses démarches en faveur de l'innovation.

### Nouvelle méthode pour quantifier le carbone organique dans les sols

Comment stocker plus de carbone (C) dans les sols pour atteindre la neutralité carbone en 2050, tout en garantissant la sécurité alimentaire ? Pour répondre à cette question, les équipes du Carnot IFPEN RE ont adapté l'équipement Rock-Eval® utilisé pour caractériser la matière organique fossile à l'analyse de la matière organique des sols. Une nouvelle méthode a été développée, qui permet de **quantifier précisément les formes de C organique présentes dans les sols en fonction de leur température de craquage**. Cette méthode permet d'évaluer le contenu en C organique de manière fiable et précise, sans analyse de calcimétrie complémentaire, ce qui contribue à mieux comprendre la dynamique du C des sols. Cette nouvelle approche a été utilisée pour étudier l'impact de procédés de réhabilitation de sols, caractériser des mélanges biochar-composts et évaluer l'impact des pratiques de gestion du sol sur la qualité de la matière organique. Les travaux ont donné lieu à des dépôts de brevets, des présentations lors de congrès et des publications à comité de lecture.



### Outils thermodynamiques innovants pour la transition énergétique

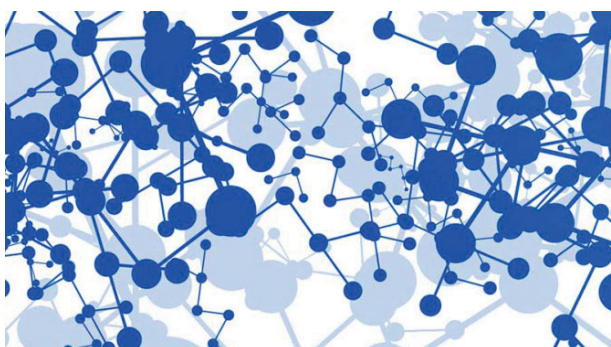
Le développement des nouvelles technologies liées à la transition énergétique (captage, utilisation et stockage du CO<sub>2</sub> ou CCUS, géothermie stockage d'énergie, ...) nécessite de mettre au point de nouveaux outils thermodynamiques. Les développements sont capitalisés dans la librairie thermodynamique du Carnot. Deux axes de recherche ont été développés en 2022 :

- le développement d'une opération unitaire de compression pour les fluides riches en CO<sub>2</sub> avant injection dans le sous-sol.
- la modélisation de la formation d'hydrates de gaz, avec la prise en compte de l'effet du confinement (milieu poreux) lors de l'injection et du stockage du CO<sub>2</sub>.

Les résultats ont permis l'implémentation d'un **nouveau type de flash thermodynamique** dans la librairie du Carnot, ainsi que d'un modèle de compresseur pour calculer les éléments dimensionnants (puissance électrique, température de sortie, etc.).

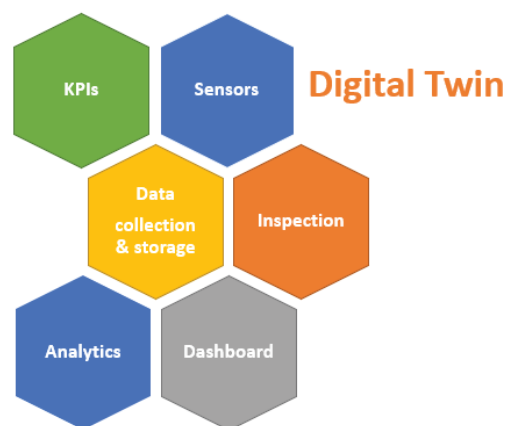
Ce modèle a été validé par comparaison avec des logiciels commerciaux.

Un flash thermodynamique adapté à la formation des hydrates a également été mis en place dans la librairie du Carnot. Il permet de déterminer les conditions et les quantités d'hydrates formées, avec prise en compte de divers inhibiteurs. Ce modèle a été validé sur des systèmes riches en eau. Il servira de base pour intégrer l'effet du confinement en 2023. Ces résultats pourraient être valorisés à terme via une implémentation dans le logiciel commercial Carbone™.



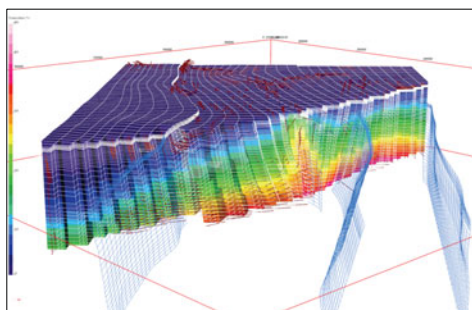
## Optimisation de la performance et de la maintenance des éoliennes grâce aux jumeaux numériques

Pour remédier à la dégradation de la performance des éoliennes au cours du temps, il est essentiel de développer des solutions de surveillance innovantes, mettant à profit à la fois les données opérationnelles remontant des éoliennes et des modèles mathématiques performants. Les axes de recherche portent sur **l'analyse de la performance et sur l'estimation de la durée de vie résiduelle des composants des éoliennes**. Plusieurs approches de détection de défauts ont été testées et appliquées à différentes éoliennes. Il a été démontré qu'il est possible de détecter une sous-performance des éoliennes liée à une erreur d'alignement à partir de données SCADA 10 min. Une méthodologie a également été développée par les équipes du Carnot IFPEN RE pour estimer la fatigue des composants structuraux des éoliennes en situation de sillage, ce qui permet d'estimer leur durée de vie résiduelle. Les résultats montrent qu'il est possible d'optimiser la performance et la maintenance des éoliennes grâce à ces solutions de surveillance innovantes.



## Modélisation thermique et transport de sel en bassin sédimentaire

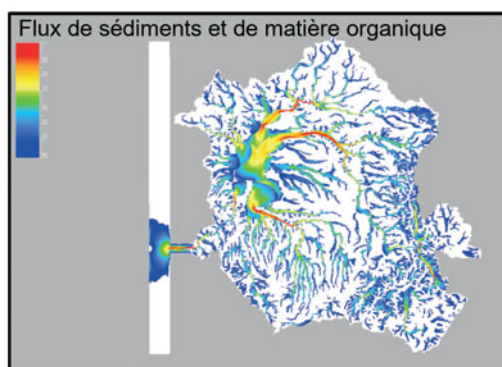
La modélisation de bassin offre une réponse à certains enjeux de la transition énergétique (géothermie, stockage souterrain de gaz, exploitation de nouvelles ressources). Les travaux menés par les équipes du Carnot IFPEN RE en 2022 ont porté sur deux domaines : la **parallélisation d'un schéma numérique pour modéliser le transport de chaleur par les failles et le développement d'un module de simulation du transport du sel**. Ils ont permis de mettre en place une première étape de parallélisation du schéma hybride pour évaluer la distribution de température. Pour la simulation du transport de sel, des lois ont été sélectionnées pour exprimer la densité et la viscosité de l'eau en fonction de la salinité, et la simulation du flux diffusif de sel a été implémentée dans le calculateur. Les développements réalisés pourront être utilisés pour modéliser tout type de transport diffusif de constituants dissous. Les tests unitaires ont été réalisés avec succès, des tests plus détaillés seront effectués en 2023.



*Simulation du transfert de chaleur par advection dans un bassin sédimentaire présentant une faille*

## Modélisation de l'érosion en zone critique

La « zone critique » (qui s'étend de la canopée jusqu'à la roche saine non altérée) est particulièrement vulnérable aux événements climatiques extrêmes induits par le changement climatique. Dans ce cadre, les chercheurs du Carnot IFPEN RE développent des **modèles de prédiction des régimes d'érosion et de capacité d'infiltration sur différentes échelles de temps et d'espace**, en se basant sur l'étude des systèmes passés. Pour ce faire, ils ont utilisé une méthode de segmentation sémantique pour cartographier les sols et ont amélioré la modélisation des écoulements de surface en introduisant des méthodes de filtrage pour réduire les erreurs numériques. Les travaux futurs s'orientent vers une meilleure description de l'hétérogénéité des sols en lien avec leur occupation. L'approche globale de caractérisation et de modélisation peut être appliquée à différents bassins versants pour évaluer leur vulnérabilité face au changement climatique et tester l'impact de différentes trajectoires d'adaptation.

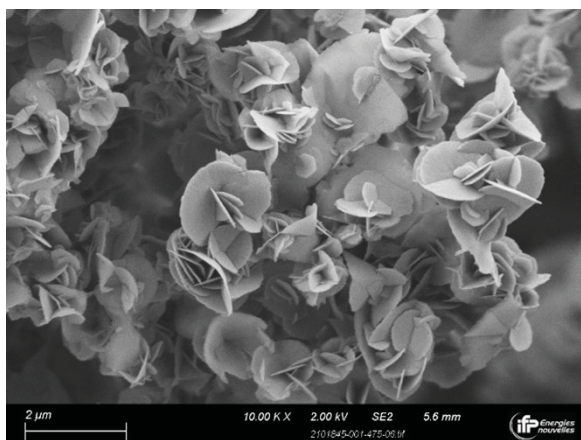


## Nouveaux matériaux pour batteries post-lithium ion

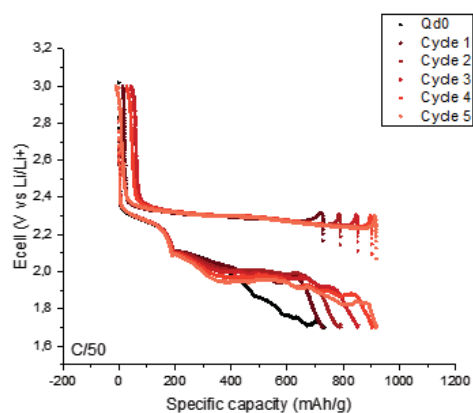
Deux types de batteries innovants sont étudiés : les batteries Li-S et les batteries organiques.

Les batteries Li-S ont une grande densité d'énergie et un faible coût. Cependant, leur durabilité est limitée par la migration de polysulfures générés lors du cyclage. Pour y remédier, une stratégie consiste à insérer des nanoparticules de sulfures de métaux de transition (TMS) à la cathode pour adsorber les polysulfures, limiter leur migration et améliorer la conductivité électronique. **Des essais de cyclage électrochimique sont en cours pour évaluer la durabilité des cellules.**

Pour les batteries organiques, des molécules organiques sont utilisées comme matière active, mais leur densité d'énergie et leur durée de vie sont encore limitées. Des progrès ont été réalisés en évaluant des molécules redox stables et peu solubles en milieu organique, en étudiant l'influence du contre-ion métallique de la molécule organique et de la nature de l'électrolyte sur la solubilité des formes réduites des électrodes, et en développant des électrolytes solides conducteurs d'halogénures pour confiner les matériaux actifs organiques. Des résultats prometteurs ont été obtenus.



Cliché MEB d'une NP de VS2



Cyclage d'une batterie LiS à base de (MoS<sub>2</sub>+S)@C

Pour en savoir + sur les thématiques R&D et les actualités  
du **Carnot IFPEN Ressources Énergétiques**

Rendez-vous sur [www.carnot-ifpen-re.fr](http://www.carnot-ifpen-re.fr)





## SALONS ET MANIFESTATIONS 2022

**5-7 avril**

Wind Europe Electric City, Bilbao



**6-9 juin**

EAGE Madrid



**5 juillet**

Cap Carnot, Paris

Cap'CARNOT



**27-28 septembre**

Colloque Ressources et usages du sous-sol dans la transition énergétique, Paris



colloque :  
Ressources et usages du sous-sol  
dans la transition énergétique

27 et 28 septembre 2022  
Cité des Sciences de Paris, salle Louis Armand.

**11 octobre**

Journées scientifiques de l'éolien, Paris, 11 octobre.



**12-13 octobre**

RDV Carnot, Paris



**23-28 octobre**

GHGT16, Lyon



**15-18 novembre**

ADIPEC, Abu Dhabi



**6 décembre**

PEXE EcoTech Journées annuelles, Paris



## HORIZON 2020 – RÉFÉRENCES

- Le projet Sun2Chem projet 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° 884444.
- Le projet 3D 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° 838031.
- Le projet SECURE 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° 764531.
- Le projet Strategy CCUS 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° 837754.
- Le projet pilotSTRATEGY 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°101022664.
- Le projet Cheers 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°764697.
- Le projet ECCSELERATE 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°101022664.
- Le projet Hiperwind 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° 101006689.
- Le projet EOCOE II 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° 824158.
- Le projet HOCCLOOP 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° 101083558
- Le projet Geco 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° 818169



RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022



## NOS ÉTABLISSEMENTS

### RUEIL-MALMAISON

1 et 4, avenue de Bois-Préau  
92852 Rueil-Malmaison Cedex - France

### LYON

Rond-point de l'échangeur de Solaize  
BP 3 - 69360 Solaize - France

**Contact : Benjamin Herzhaft**

+33 1 47 52 72 55 • Benjamin.Herzhaft@ifpen.fr