

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2020

# CARNOT

## IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES



Pages

# SOMMAIRE

03

**LE MOT DU DIRECTEUR**

04

**IFP ENERGIES NOUVELLES**

05

**IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES EN BREF**

06

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

- CAPTAGE, STOCKAGE ET VALORISATION DU CO<sub>2</sub>
- INTERACTIONS CLIMAT/SOLS, MISE EN PLACE D'UNE FEUILLE DE ROUTE
- ÉOLIEN OFFSHORE ET ÉNERGIES MARINES : LE VENT EN POUPE
- STOCKAGE D'ÉNERGIE : CAP SUR L'INTÉGRATION DES RENOUEVELABLES
- GESTION RESPONSABLE DU SOUS-SOL
- LA RÉCUPÉRATION ASSISTÉE POUR PRODUIRE MIEUX
- SOUS-SOL : MIEUX LE COMPRENDRE ET LE MODÉLISER

10

**GRAND ANGLE :**

- ÉOLIEN OFFSHORE: LE CARNOT IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES SE MOBILISE
- ROCK-EVAL® : ANALYSE THERMIQUE DES ROCHES ET DES SOLS

14

**OUVERTURE INTERNATIONALE**

16

**SALONS ET MANIFESTATIONS 2020**

## LE MOT DU DIRECTEUR



L'année 2020 a démarré avec la labellisation Carnot des activités ressources énergétiques d'IFPEN et la création du Carnot IFPEN Ressources Energétiques (Carnot IFPEN RE). Je tiens à dire combien nous sommes fiers de faire désormais partie du réseau des Carnot. Cette labellisation est une reconnaissance de notre capacité à mener des projets de recherche partenariale au service de l'innovation des entreprises, dans les domaines de la transition énergétique et écologique et du virage numérique que traverse actuellement notre société.

Grâce à la complémentarité des ressources et des compétences, cette labellisation nous permet de nouer davantage de coopérations scientifiques attractives et de

renforcer notre ancrage national et international auprès des acteurs industriels engagés dans cette transition.

En outre, grâce à la dynamique liée à l'abondement qui en découle, nous amplifions nos actions de ressource scientifique afin d'accélérer notre contribution à cette évolution sociétale et de développer les compétences stratégiques associées.

Les projets conduits en 2020 par les équipes du Carnot se sont inscrits dans une année marquée par une crise sans précédent, accompagnée par une baisse notable de la demande d'énergie et une certaine résilience des investissements mondiaux pour les énergies renouvelables.

La transition digitale engagée depuis plusieurs années et notre adaptabilité ont permis au Carnot IFPEN RE de répondre présent face aux enjeux :

- du « risque climat » lié aux activités industrielles, via la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Notons ainsi, par exemple, le lancement du projet DinamX dont l'objectif est d'opérer la démonstration du procédé IFPEN DMX™ pour décarboner du gaz de haut-fourneau et d'étendre son champ d'application à d'autres types d'émetteurs, afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> en France.

- du développement des énergies renouvelables ainsi que leur intégration dans le réseaux d'électricité via le stockage de l'énergie.

Concernant ces énergies renouvelables on pourra notamment mentionner l'éolien flottant qui a fait l'objet, cette année, d'avancées majeures (*voir p. 10*). De plus, le Carnot a obtenu le meilleur score lors d'un benchmark proposé dans le cadre du programme de collaboration sur les technologies éoliennes de l'Agence Internationale de l'Energie IEA Wind.

On pourra également citer les travaux réalisés sur la géothermie ou encore l'hydrogène.

- d'une production d'hydrocarbures plus respectueuse de l'environnement en minimisant les risques liés à l'exploration et la production, à terre comme en mer.

Le Carnot IFPEN RE s'est également appliqué à se rapprocher davantage des PME et PMI via une approche proactive et de nouveaux *business models*. Il travaille à renforcer ses liens avec les autres Carnot, notamment au travers des nouvelles alliances à construire, ainsi qu'avec les Comités Stratégiques de Filière (CSF), dans le but de proposer l'offre la plus lisible et la plus complète possible et mutualiser les efforts de recherche.

Les projets collaboratifs à financements publics nationaux ou européens ont également été en 2020 un enjeu majeur pour le Carnot IFPEN RE (*voir page 14*).

Découvrez, dans ce premier rapport d'activité du Carnot IFPEN RE, un panorama des actions menées par nos équipes en 2020.

Bonne lecture !

**Eric Heintzé**

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.



# IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES EN BREF



Le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques est un acteur majeur de la transition énergétique. Au sein d'IFP Energies nouvelles, il offre à ses partenaires industriels des solutions innovantes afin de développer des énergies renouvelables compétitives, de minimiser l'impact climatique des activités industrielles et de produire de manière plus respectueuse de l'environnement les énergies fossiles strictement nécessaires dans cette période de transition. Il s'appuie notamment pour cela sur les nouvelles opportunités du digital.

## LES MISSIONS ET ENJEUX DU CARNOT IFPEN RE, ENGAGÉ POUR UN MIX ÉNERGÉTIQUE DURABLE

### Développer les énergies renouvelables

- Évaluer la ressource et maîtriser les risques de production des nouvelles énergies du sous-sol
- Intégrer les renouvelables dans le réseau électrique à l'échelle territoriale par le stockage et les systèmes de management de l'énergie (EMS)
- Mettre au point des technologies offshore d'optimisation de la production et de contrôle digital pour l'éolien

### Minimiser le risque climat lié aux activités industrielles

- Appréhender les problématiques associées au cycle de l'eau
- Comprendre et prévoir les interactions sol / climat dans le contexte du changement climatique
- Développer des technologies de captage, de valorisation et de stockage du CO<sub>2</sub>

### Produire les hydrocarbures strictement nécessaires de manière plus respectueuse de l'environnement

- Assurer une meilleure gestion des eaux de production
- Améliorer la production des champs matures à l'aide de technologies écoresponsables
- Minimiser les risques liés à l'exploration, au forage et à la production

### S'appuyer sur le digital

Les opportunités offertes par le digital sont au cœur du développement des activités du Carnot IFPEN RE en termes :

- de nouveaux « *business models* » avec nos partenaires
- d'innovations technologiques et de nouveaux services

## Le Carnot IFPEN RESSOURCES ÉNERGETIQUES en 2020, c'est :

14 laboratoires de recherche représentant 480 ETP dont 47 doctorants et post-doctorants

63 contrats de recherche contractuelle dont 36 à l'international

22 contrats actifs de licences de technologies dont 17 avec des ETI/PME/TPE

13 projets de recherche collaborative auxquels contribuent 28 entreprises partenaires

35 brevets déposés dans l'année et 1587 détenus dans le portefeuille de brevets

85 publications de rang A

## ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

### Fait marquant

#### IFPEN et l'Unesco s'associent dans le domaine des géosciences

IFPEN, via son Carnot IFPEN RE, et l'Unesco ont signé un accord-cadre de partenariat dans le domaine des géosciences pour une gestion durable des ressources en faveur de la transition énergétique. Il concerne, d'une part, la recherche et la formation relatives aux sciences de la terre, en proposant des sujets de thèse en lien avec le stockage géologique de CO<sub>2</sub> ou d'hydrogène, la géothermie, l'exploitation des ressources du sous-sol ou encore la compréhension des interactions entre les changements climatiques et les écosystèmes à partir de l'étude des systèmes sédimentaires.

D'autre part, il promeut la digitalisation dans les géosciences, notamment à partir d'outils numériques développés par le Carnot IFPEN RE qui pourront être déployés dans les parcs géologiques internationaux labellisés par l'Unesco, avec une double finalité : faire de la pédagogie, mais également tester et enrichir ces applications en s'appuyant sur une approche de science participative.

## Captage, stockage et valorisation du CO<sub>2</sub>

Les efforts de recherche du Carnot IFPEN Ressources Energétiques dans le domaine du captage, du stockage et de la valorisation du CO<sub>2</sub> (CCUS) s'intensifient. Objectif : améliorer les différents maillons de la chaîne, en commençant par le captage, étape la plus coûteuse, en passant par la compression du CO<sub>2</sub> et son transport, et jusqu'au stockage massif, avec une surveillance continue des sites pour garantir la sécurité sur une longue période. Le Carnot développe des technologies en partenariat avec des industriels et accompagne les pouvoirs publics et les industriels dans l'évaluation (analyses de cycle de vie, études technico-économiques) et les scénarios de déploiement de ces technologies.

### Fait marquant

#### Captage du CO<sub>2</sub> : lancement de DinamX, un projet de démonstration sur un pilote industriel du procédé IFPEN DMX™

Le projet Investissement d'Avenir DinamX « Démonstration et applications innovantes du DMX™ » a été lancé pour quatre ans avec la participation d'IFPEN via son Carnot IFPEN RE, Axens, Total et ArcelorMittal France. Le procédé DMX™ sera d'abord démontré sur le pilote construit et financé dans le cadre du projet 3D, sur le site d'ArcelorMittal à Dunkerque. Coordonné par Axens, le projet DinamX a pour objectif d'opérer la démonstration du procédé IFPEN DMX™ pour décarboner du gaz de haut-fourneau et d'évaluer les possibilités d'application de ce procédé à des émetteurs autres que l'industrie sidérurgique concernée par le projet européen H2020 3D.

### Fait marquant

#### Florence Delprat-Jannaud élue Présidente du Club CO<sub>2</sub>

Le 5 mars 2020, lors du renouvellement du bureau du Club CO<sub>2</sub>, Florence Delprat-Jannaud, en charge du programme « Captage et stockage du CO<sub>2</sub> » du Carnot IFPEN RE, a été élue présidente de l'association pour une durée de trois ans.

Le Club CO<sub>2</sub> regroupe 30 membres, acteurs du monde industriel et de la recherche. Lieu d'échanges, d'informations et d'initiatives entre ses membres dans le domaine des études et des développements technologiques en matière de CCUS, le Club CO<sub>2</sub> promeut le déploiement de la filière française et encourage la coopération à l'échelle nationale entre les secteurs public et privé. Ces initiatives sont à l'origine d'un nombre grandissant de démonstrateurs et de projets de recherche.



## Interactions climat/sols, mise en place d'une feuille de route

Les sols sont des écosystèmes fragiles et sensibles au changement climatique ; ils constituent le second réservoir de carbone sur terre. En 2020, le sixième cycle d'évaluation du GIEC a conclu à une augmentation des phénomènes extrêmes et à l'amplification des risques naturels. Ces éléments ont donné lieu au Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC), dont l'un des objectifs est de renforcer la résilience des écosystèmes (sols, forêt, mer et littoral, biodiversité et ressources en eaux) afin de leur permettre de s'adapter au changement climatique. De plus, la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) a mis en avant le caractère incontournable du stockage de carbone dans les sols pour atteindre la neutralité carbone en 2050. En 2020, le Carnot IFPEN RE a établi une feuille de route autour des enjeux climat/sols pour contribuer à accroître la teneur en carbone pérenne et à réduire la vulnérabilité des systèmes et les impacts. Il a également travaillé à l'adaptation de sa méthode thermique Rock-Eval® pour comprendre la dynamique du carbone dans les sols.

### Fait marquant

#### Le Carnot IFPEN RE accueille le Docteur David Sebag, spécialiste de la science du sol pour un an

Le Carnot IFPEN RE accueille, depuis avril 2020, l'écologue des sols David Sebag, Maître de conférences à l'université de Rouen (Laboratoire morphodynamique continentale et côtière) et chercheur associé à l'université de Lausanne (Laboratoire biogéosciences). Son expertise sur les environnements des 10 000 dernières années en contexte archéologique et les environnements récents (100 ans) replace les changements climatiques actuels dans une perspective à plus long terme et renforce les compétences du Carnot sur les interactions entre le sol et le climat.



### Fait marquant

#### Violaine Lamoureux-Var, lauréate du prix FIEEC Carnot pour Rock-Eval® 7S

La 7<sup>e</sup> génération de l'équipement Rock-Eval® avec la caractérisation rapide du carbone et du soufre a été mise sur le marché. En novembre, Violaine Lamoureux-Var a reçu le prix FIEEC Carnot de la Recherche appliquée 2020, pour les travaux menés avec la PME Vinci Technologies concernant la mise au point du Rock-Eval® 7S. Ce prix distingue des travaux développés en lien avec une PME, avec un véritable impact en matière de croissance et de création d'emploi. Cet équipement d'analyse géochimique, d'abord conçu pour l'évaluation des roches, est au cœur de travaux de recherche utilisant des méthodes thermiques pour caractériser les carbones organiques et contribuer à l'évaluation de la qualité des sols, de leur fertilité et de leur rôle dans la régulation du climat.

Voir aussi page 12 : Rock-Eval® : analyse thermique des roches et des sols



## Éolien offshore et énergies marines : le vent en poupe

L'éolien offshore est porté par des projets de plus en plus ambitieux en Asie et en Europe. Le Carnot IFPEN RE axe ses efforts de recherche sur la conception de technologies pour les éoliennes flottantes prenant en compte des physiques complexes, le développement de systèmes de contrôle à l'échelle d'une éolienne et d'un parc, notamment la modélisation des effets de sillages entre éoliennes d'une même ferme, afin d'optimiser l'implantation des éoliennes et la production de la ferme. Le Carnot met également au point des jumeaux numériques intégrant des modèles physiques et des capteurs pour optimiser la production et la maintenance. Les équipes poursuivent par ailleurs des recherches sur le contrôle actif d'une technologie houlomotrice performante.

**Éolien marin flottant, le Carnot IFPEN RE se mobilise : voir le Grand Angle page 10**



### INTERVIEW DE :

**Anand Natarajan,**  
Chef de section, département d'énergie éolienne, université technique du Danemark

Le projet européen H2020 Hiperwind, lancé en décembre 2020, est composé d'un consortium d'industriels, universités et instituts de recherche, et piloté par l'université technique du Danemark (DTU). Il répond à l'appel de la Commission européenne sur la science de base dans l'énergie éolienne offshore. Il a pour objectif d'améliorer la chaîne complète de modélisation des éoliennes offshore, de l'échelle atmosphérique à celle des fermes, puis des composants de la turbine, en quantifiant les différentes sources d'incertitude. Cela permettra de réduire significativement les coûts des éoliennes et d'optimiser la production électrique d'une ferme. Le Carnot IFPEN RE mène notamment les tâches liées à la modélisation des interactions de sillages d'éoliennes dans un parc.

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.

### Fait marquant

#### Collaboration avec Beoga : une gestion optimisée de l'énergie

Le Carnot IFPEN RE et la start-up Beoga ont démarré une collaboration visant à développer un écosystème matériel et logiciel qui optimise la production et la consommation d'énergies de communautés énergétiques.

Les développements du Carnot concernent la gestion de batteries stationnaires et le pilotage de la charge *Vehicle to Grid*, permettant de valoriser ces flexibilités pour une meilleure efficacité énergétique et pour rendre des services au réseau.

## Stockage d'énergie : cap sur l'intégration des renouvelables

Le Carnot IFPEN RE concentre son activité sur le stockage stationnaire d'énergie électrique en ciblant le développement de batteries à flux offrant de fortes puissances et capacités. Il développe aussi des solutions de gestion de l'énergie et de pilotage de la production et de la consommation afin de faciliter l'intégration des renouvelables dans le réseau.



## Gestion responsable du sous-sol

En 2020, le Carnot IFPEN RE a poursuivi ses efforts de recherche destinés à minimiser les risques pour la sécurité et l'environnement lors de la valorisation du sous-sol. Les travaux s'articulent autour de la géothermie, l'hydrogène, la surveillance industrielle et environnementale, ainsi que des outils pour la modélisation géologique des stockages. Dans le cadre du projet européen Deepen qui vise à sécuriser la géothermie profonde, le Carnot développe un outil pour évaluer les risques de dépôt et de corrosion dans les puits. En matière de géologie urbaine, un modèle de sous-sol de l'agglomération de Cergy-Pontoise est en développement au sein du projet Tiga « Construire au futur, habiter le futur ». Pour appréhender le comportement des stockages souterrains, le Carnot a consolidé en 2020, à l'aide de plusieurs études, le logiciel CooresFlow™ de simulation des interactions fluides-roches. Enfin, le Carnot a développé une offre globale pour la surveillance environnementale des sites industriels : la FlairSuite.

### Fait marquant

#### La FlairSuite : une offre pour la surveillance industrielle et environnementale



Le Carnot IFPEN RE développe une offre complète dédiée à la mesure et à l'analyse des compositions de gaz de l'air et du sol pour des applications en surveillance industrielle et environnementale. Cette offre, la FlairSuite, se compose d'équipements de mesure mobiles ou fixes, d'instruments de laboratoire, ainsi que d'un outil de traitement, visualisation et stockage des données : FlairBox™, station mobile d'analyse multigaz de l'air et du sol ; FlairCar™, station mobile autonome d'analyse multigaz de l'air ; FlairSoil™, station fixe d'analyse multigaz du sol et du sous-sol ; FlairLab™, laboratoire gaz pour études complémentaires ; et enfin FlairMap™, application web interactive de traitement des données.

### Fait marquant

#### Simulation de bassin : c'est parti pour le projet Moabi

Démarré en 2020 en partenariat avec Total, le projet Moabi vise au couplage de phénomènes physiques à l'échelle du bassin sédimentaire pour faire de la simulation de bassin un outil de modélisation générique pour les géosciences du sous-sol. Il s'agit notamment d'identifier les meilleurs prospects de stockage (CO<sub>2</sub>, etc.) et d'initialiser les simulateurs de prévisions, en maîtrisant la connaissance des processus en interaction, passés et présents, qui contrôlent le bassin à l'heure actuelle. L'intégrité des couvertures, la stabilité des failles et les capacités de stockage font partie des enjeux.

## FOCUS

En octobre 2020, le Carnot IFPEN RE a rejoint aux côtés de deux partenaires la chaire industrielle Orhyon, sélectionnée par l'ANR et portant sur l'hydrogène et sa réactivité dans le sous-sol en présence de micro-organismes.

## La récupération assistée pour produire mieux

La récupération améliorée des hydrocarbures (EOR : *Enhanced Oil Recovery*) reste un enjeu de taille pour les compagnies pétrolières, car elle 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, le Carnot IFPEN RE, Beicip-Franlab et Solvay développent, au sein de l'Alliance EOR, des technologies et services adaptés aux différentes conditions de réservoir et à tout type 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. Les travaux portent également sur une gestion des eaux de production respectueuse de l'environnement.

## Sous-sol : mieux le comprendre et le modéliser

Malgré une moindre demande de pétrole et de gaz en 2020, une chute du prix de ces deux énergies et des investissements en exploration/production en baisse de 30 %, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) accorde dans ses scénarios une place significative à ces énergies qui devraient contribuer à hauteur de 46 à 53 % du mix énergétique mondial à l'horizon 2040 (54 % en 2019). Développer des solutions innovantes reste donc crucial pour continuer à explorer et produire ces énergies nécessaires durant cette transition, tout en respectant le milieu naturel. La connaissance des bassins sédimentaires et des réservoirs d'hydrocarbures exploités par l'industrie pétrolière est primordiale pour réduire les risques et limiter le nombre de forages dans le respect de l'environnement. Dans ce contexte, le Carnot IFPEN RE met au point des solutions de modélisation quantitative du sous-sol, des méthodologies d'analyse de risques et des équipements de production.

### Fait marquant

#### Une expertise sur les roches carbonatées au service de l'industrie grâce aux JIP CarDIO™ et Aquarius

Le Carnot IFPEN RE consolide son expertise sur les réservoirs complexes et les roches carbonatées grâce à des Joint Industry Projects (JIP). Ces projets collaboratifs d'une durée de trois ans permettent aux équipes du Carnot de développer et de valider des méthodologies et des technologies en phase avec les problématiques concrètes des industriels. De leur côté, ces derniers bénéficient de l'expertise du Carnot IFPEN RE et des résultats de ses travaux. Depuis 2019, le JIP CarDIO™ étudie la transformation des sédiments carbonatés en roches par des processus diagénétiques précoces tels que l'action des eaux souterraines, au sein de la modélisation stratigraphique. Quant au JIP Aquarius, il est dédié aux réservoirs riches en carbonates dans un système lacustre hétérogène, la Green River Formation (USA) servant de modèle de référence. Sur ce thème, le Carnot IFPEN RE a organisé un workshop qui a réuni des experts de neuf compagnies internationales.

### Fait marquant

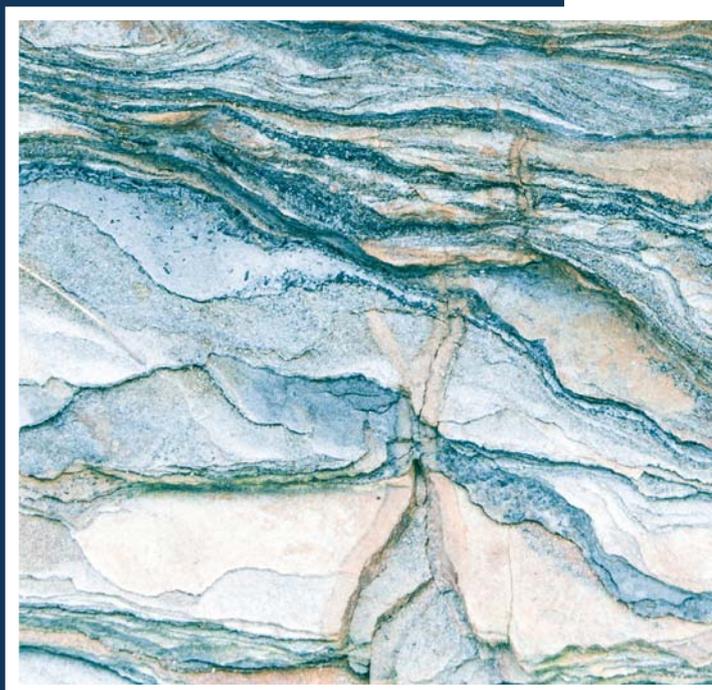
#### JIP Dolphin 3 : pour une gestion éco-efficace des eaux de production

Le *Joint Industry Project (JIP) Dolphin 3*, démarré fin 2019 avec six partenaires industriels internationaux et consacré à l'étude de l'impact des additifs utilisés en EOR chimique sur la gestion des eaux de production, a donné de premiers résultats concluants. Ceux-ci permettent de proposer une offre éco-efficace, comprenant des technologies dédiées à la séparation des effluents pétroliers, au traitement optimisé et à la réinjection des eaux de production. Dans ce cadre, une unité de traitement des eaux a été mise en place avec Suez sur la plateforme IFPEN RE dédiée GOWSP (*Gas Oil water Separation Platform*) sur le site de Lyon.

### Fait marquant

#### Mise sur le marché de la première version du logiciel Carbone

Carbone, logiciel de modélisation de fluides (PVT), fait désormais partie du catalogue de la PME Kappa Engineering. Basé sur la librairie thermodynamique développée par IFPEN, Carbone est le fruit d'un partenariat entre le Carnot IFPEN RE, Beicip-Franlab et Kappa Engineering. En prédisant le comportement thermodynamique des fluides pétroliers, il permet d'alimenter les modèles de simulation de production de champs.

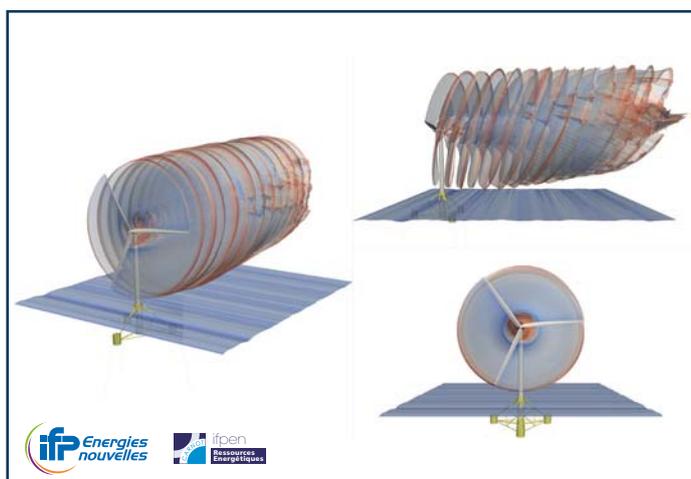


### Eolien offshore : le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques se mobilise

Aujourd'hui, si la capacité installée de l'éolien en France est supérieure à 17,5 GW, elle demeure exclusivement terrestre. Des projets ambitieux prévoient de construire des éoliennes au large des côtes françaises afin de profiter d'un potentiel marin significatif (entre 10 à 30 GW). Parmi les solutions envisagées, il est prévu de recourir à l'éolien flottant et non posé, solution préférentielle pour des profondeurs d'eau qui dépassent les 50 mètres.

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. Dans cet objectif, les équipes ont élaboré une stratégie de recherche qui s'articule autour de quatre axes :

- le dimensionnement des structures,
- la prise en compte des effets de sillage,
- le contrôle des éoliennes et des parcs éoliens,
- la mise en place de jumeaux numériques pour faciliter la production et la maintenance.



#### Dimensionnement des structures

Pour réduire les coûts des éoliennes marines sans sacrifier leur performance ni leur sécurité, il est crucial de bien dimensionner ces structures et particulièrement leurs fondations. Pour ce faire, la simulation numérique est un atout de poids, pourvu qu'elle prenne en compte l'ensemble des sollicitations (houle, vent, ...). Ce couplage est réalisé par le logiciel DeepLines WindTM que le Carnot IFPEN RE développe conjointement avec la PME Principia, et utilise dans les simulations qu'il mène pour le comportement des éoliennes flottantes.

L'utilisation de ce logiciel est notamment au cœur de la collaboration entre le Carnot et SBM Offshore qui vise à développer une solution de flotteur compétitive, pour l'éolien flottant.

En outre, dans le cadre des études de dimensionnement, 6 millions d'heures de calcul sur le supercalculateur Jean Zay, obtenues lors de l'appel à projet « Grands Challenges », ont permis au Carnot IFPEN RE de tester le comportement

d'éoliennes offshore flottantes sous des conditions environnementales les plus diverses, en balayant toutes les configurations possibles de conditions de vent (vitesse moyenne, turbulence et direction) et de mer (hauteur, période et direction de la houle).

Ces simulations numériques constituent une base de référence exhaustive pour étudier la fatigue des éoliennes marines et optimiser leur conception. Cette base peut ensuite être utilisée dans un plan d'expérience adaptatif capable d'identifier automatiquement les configurations de vent et de houle les plus préjudiciables pour les structures. Économies en temps de calcul et très précises, ces méthodologies devraient aboutir à de nouvelles approches pour l'ingénierie et la certification des futurs projets d'éoliennes flottantes.

Le Carnot IFPEN RE participe également au projet européen H2020 Hiperwind (*Highly advanced Probabilistic design and Enhanced Reliability methods for high-value, cost-efficient offshore WIND*) piloté par l'université technique du Danemark et destiné à améliorer la prise en compte des incertitudes sur le design des éoliennes en mer, incertitudes provenant des limitations propres aux modèles actuels et aux insuffisances du couplage entre ces différents modèles (voir page 7).

#### Prise en compte des effets de sillage

Les éoliennes étant intégrées au sein de parcs, il est nécessaire de prendre en compte les effets de sillage entre éoliennes. En effet, ce phénomène peut diminuer d'un facteur allant jusqu'à 40 % la puissance produite par une éolienne aval. Pour ce faire, le Carnot IFPEN RE a développé sa propre solution, le logiciel FarmShadow, qui contient plusieurs modèles de sillage et permet de mieux estimer les efforts sur des éoliennes placées au milieu de parcs. Pour enrichir et perfectionner ces modèles, le Carnot IFPEN RE participe au projet ANR Momenta (*farM Otor ModEl accouNting aTmospheric wAke turbulence*), qui a démarré en janvier 2020 pour 4 ans.

## Le Carnot IFPEN RE obtient le meilleur score dans un benchmark proposé par le programme IEA Wind

Dans le cadre du programme de collaboration sur les technologies éoliennes de l'Agence Internationale de l'Energie IEA Wind, plusieurs laboratoires de recherche ont concouru pour résoudre le problème du meilleur positionnement possible de près de 80 éoliennes au sein d'une ferme offshore, dans le but d'en maximiser la production. Le cas d'étude, constitué de cinq zones prédéfinies, schématisait un parc en cours de construction aux Pays-Bas. Les conditions de vent représentatives d'une année étaient fournies, ainsi que les effets de sillage des éoliennes entre elles. La solution proposée par le Carnot IFPEN RE a obtenu la meilleure note, en permettant d'obtenir une production électrique annuelle supérieure à celle des autres laboratoires participants.



## Contrôle des éoliennes et des parcs éoliens

Le Carnot IFPEN RE développe également des outils permettant le contrôle d'éoliennes et de parcs, basés sur la connaissance du vent incident mesuré par lidar. Une première brique du système est constituée par le logiciel WiSE-WindField™ qui reconstruit avec précision le champ de vent incident à partir des données brutes d'un lidar placé sur la nacelle d'une éolienne. Un partenariat a été établi avec la PME Leosphere pour intégrer ce produit à ses solutions de contrôle.

Une deuxième brique, WiSE-Control™, concerne le développement de stratégies de contrôle et permet d'adapter certains paramètres de l'éolienne aux conditions de vent (orientation pales, nacelle, ...).

Un système de pilotage collectif de la ferme par minimisation des interférences aérodynamiques entre éoliennes et redirection de sillages est également en cours de développement et fera l'objet d'une troisième brique : WiSE-Farm™.

## Des jumeaux numériques pour faciliter la production et la maintenance

Les équipes du Carnot poursuivent des travaux sur le développement de jumeaux numériques permettant de mieux évaluer les chargements réellement subis par les éoliennes, d'anticiper des dysfonctionnements et de faciliter la maintenance. Il s'agit d'interpréter grâce à des modèles les données émanant du système de monitoring standard des éoliennes (SCADA -Supervisory Control and Data Acquisition) pour connaître son état de fonctionnement (efforts exercés, comportement vibratoire, ...) et être alerté en cas d'anomalie. Cette surveillance en continu permet de prédire la durée de vie des composants, de remédier aux problèmes d'endommagement et de sous-performance, et en fin de compte de disposer d'éléments pour étendre la durée de vie de l'éolienne.

## Rock-Eval® : analyse thermique des roches et des sols

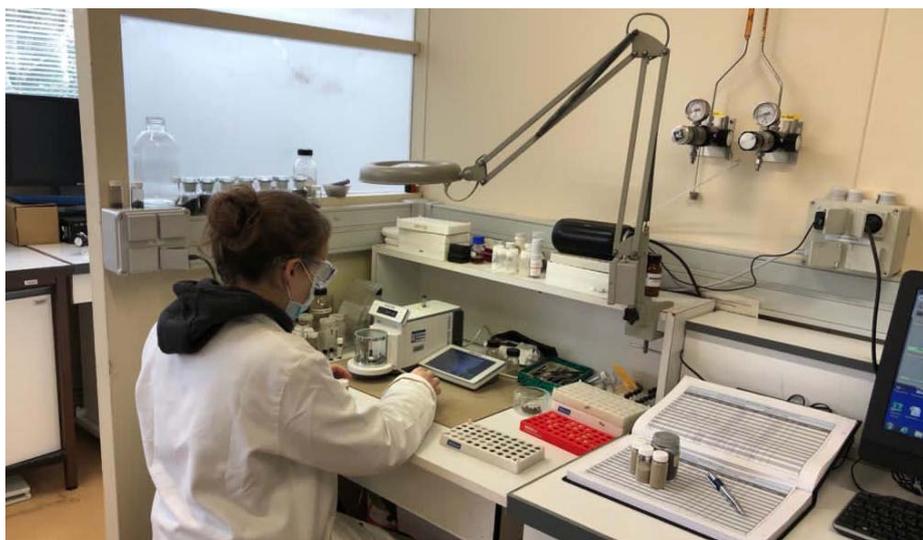
Mis au point à l'origine pour évaluer le potentiel pétrolier des roches, Rock-Eval® se prête aujourd'hui à une plus large gamme d'applications comme l'étude des roches sédimentaires, l'analyse des polluants, l'évaluation de la qualité des sols et la géothermie.

### ROCK-EVAL® : UNE INNOVATION IFPEN ET VINCI TECHNOLOGIES

Dans les années 1970, IFPEN a développé le procédé de laboratoire Rock-Eval®, qui permet, en une petite heure d'analyse, de déterminer la teneur en carbone d'une roche. Au fil des ans, l'outil a évolué pour remplir d'autres fonctions. Il n'analyse plus uniquement les roches, mais aussi tout matériau organique (ayant des composés constitués de carbone), naturel ou artificiel. Rock-Eval® permet notamment de caractériser la matière organique des sols. De plus, il ne mesure pas seulement le contenu en carbone organique et minéral d'un matériau, il renseigne aussi sur la réactivité thermique des composés organiques et carbonatés des roches et des sols.

#### Que peut-on analyser avec Rock-Eval® ?

- Des matériaux naturels comme les roches sédimentaires, les sédiments récents, les sols, les kérogènes, la biomasse végétale, le coke, etc.
- Des matériaux artificiels comme les inhibiteurs de corrosion, les catalyseurs ou les lubrifiants.



Cet équipement, né dans les laboratoires du Carnot IFPEN Ressources Énergétiques, résulte d'un partenariat avec la PME Vinci Technologies, qui participe à la mise au point et commercialise les différentes versions de Rock-Eval®. La dernière version en date, Rock-Eval® 7S, permet d'évaluer les composés soufrés.



#### Rock-Eval® 7S récompensé

En 2020, le prix FIEEC Carnot de la Recherche appliquée a été décerné à Violaine Lamoureux-Var pour ses travaux menés en partenariat avec la PME Vinci Technologies dans la mise au point de Rock-Eval® 7S. Le partenariat a permis de valider l'équipement et de développer de nouvelles méthodes d'analyse et d'interprétation.



## LES DOMAINES D'APPLICATION DE ROCK-EVAL®

### Évaluation du potentiel pétrolier des roches sédimentaires

Le procédé Rock-Eval® est utilisé comme technique de référence en exploration et en production pétrolières depuis les années 1980, pour l'identification et la caractérisation des roches mères et des roches réservoirs, par criblage rapide de grands nombres d'échantillons de roche. Il permet notamment d'évaluer le potentiel pétrolier d'une roche mère, son type selon l'environnement de sédimentation, et sa maturité. Il permet aussi d'estimer les quantités de pétrole en place d'un niveau géologique.

### Tracer la matière organique des roches sédimentaires

Rock-Eval® est également utilisé pour quantifier les teneurs en carbone organique et en carbone minéral et pour tracer les sources de la matière organique des roches sédimentaires et des sédiments récents. Ces applications concernent aussi bien les domaines marins et littoraux que les milieux lacustres et fluviaux.

### Analyser les polluants hydrocarbures des sols et des sédiments

Dans le domaine de la pollution des sols et des sédiments, l'analyse Rock-Eval® permet un diagnostic rapide de la quantité de polluants et du type d'hydrocarbures présents. La méthode, déclinée au sein d'un analyseur portable, permet aussi de déterminer sur site en temps réel les volumes de terres polluées et de comparer au cours du temps l'efficacité de procédés de dépollution mis en œuvre in-situ. Elle est aussi applicable pour évaluer l'imprégnation des déblais de forage par les boues de forage.

### Caractériser la matière organique des sols

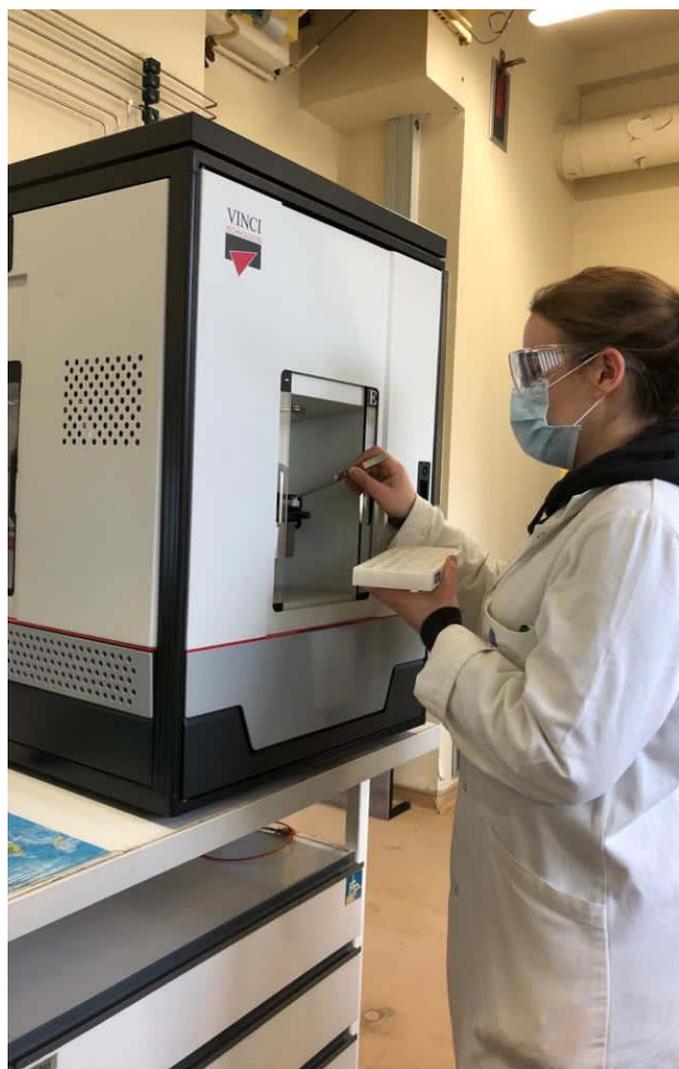
Dans le domaine de la pédologie (étude de la formation et de l'évolution des sols), l'analyse Rock-Eval® est aussi utilisée pour quantifier la teneur en carbone organique et pour caractériser la matière organique des sols. De plus, des approches interprétatives spécifiques ont été proposées pour analyser la part de la matière organique des sols la plus réactive ou pour quantifier la part de carbone persistant dans le sol à l'échelle centennale.

### Le fonctionnement de Rock-Eval®

Rock-Eval® mesure en continu les composés carbonés (et soufrés sur la version 7S) issus d'un échantillon, simultanément à sa dégradation thermique progressive alors qu'il est soumis à une température croissante programmée. Deux phases de chauffe se succèdent, la première sans oxygène (pyrolyse), puis la deuxième en présence d'oxygène, entraînant la combustion du résidu de pyrolyse. Les composés thermiquement labiles sont caractérisés durant la phase de pyrolyse, tandis que la phase de combustion permet d'oxyder le résidu de pyrolyse et d'avoir ainsi accès aux teneurs en carbone organique et minéral (et en soufre sur la version 7S). L'analyse proprement dite des gaz se fait grâce à différents capteurs. Durant la phase de pyrolyse, un détecteur à ionisation de flamme mesure les composés hydrocarbonés, tandis qu'un détecteur infrarouge (IR) repère les gaz CO et CO<sub>2</sub>. Durant la phase de combustion, un détecteur à ultraviolet (UV) prend en compte les composés soufrés transformés en SO<sub>2</sub>.

### Rock-Eval® 7S : le soufre en plus

Le Rock-Eval® 7 Soufre, toute dernière version du Rock-Eval, permet de quantifier la teneur en soufre des pétroles, des kérogènes, de certaines roches et des sols, au-delà de l'analyse de la matière organique. Grâce à l'identification de minéraux soufrés tels que les sulfures métalliques, il apporte une caractérisation plus fine des matériaux étudiés. Cette connaissance permet de mieux anticiper certains risques liés à la présence de soufre, préciser la nature des polluants et adapter les techniques de remédiation dans le cas d'environnements pollués comme les sols par exemple.



Pour en savoir plus sur la méthode analytique de Rock-Eval®, rendez-vous sur [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr)

## OUVERTURE INTERNATIONALE

Le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques se caractérise par un fort ancrage à l'international. Ainsi plus de la moitié de ses contrats de recherche contractuelle concerne des activités qui couvrent tous les continents. Par ailleurs, il dispose de relations privilégiées avec de nombreux « Research Technology Organisations » (RTO), via notamment des accords-cadres et partenariats stratégiques. Il est également partie prenante de nombreux organismes scientifiques de premier plan mondial. À titre d'exemple, il est le représentant de la France au Comité exécutif du Programme de coopération technologique IEA Wind de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Engagé dans de nombreux réseaux, plateformes technologiques et projets soutenus par l'Union européenne, il contribue à la construction de l'espace européen de la recherche en faveur de la transition énergétique.

Enfin, le Carnot participe à des projets à financements nationaux qui comptent, parmi leurs partenaires, des entreprises ou organismes internationaux.

*À noter : les projets cités ci-dessous sont ceux qui ont effectivement démarrés en 2020. Ceux qui ont été acceptés en 2020 et démarreront en 2021 ne sont pas cités ici.*

## LES PROJETS COLLABORATIFS EUROPÉENS ET INTERNATIONAUX

### Captage, stockage et utilisation du CO<sub>2</sub>



#### Projet H2020 Sun2Chem : pour une réduction efficace des émissions de CO<sub>2</sub> grâce à l'énergie solaire

Le projet européen H2020 Sun2Chem, lancé en 2020, vise à développer des solutions pour une réduction efficace des émissions de CO<sub>2</sub> grâce à l'énergie solaire. L'objectif est la transformation du CO<sub>2</sub> en éthylène.



#### Projet H2020 STRATEGY CCUS : étude de plusieurs régions européennes pour évaluer leurs capacités en matière de CCUS

Le projet H2020 Strategy CCUS, lancé en 2019, a pour objectif d'élaborer des plans stratégiques pour le développement du CCUS en Europe et de réfléchir à la construction d'une infrastructure CCUS à l'échelle européenne.

<https://www.strategyccus.eu/>



#### Projet H2020 3D : captage de CO<sub>2</sub> sur le site sidérurgique d'ArcelorMittal à Dunkerque

Le projet européen H2020 3D (DMX™ Demonstration in Dunkirk) réunit 11 partenaires et est piloté par le Carnot IFPEN RE. Démarré en 2019, il vise à faire la démonstration industrielle du procédé DMX développé par le Carnot sur un site sidérurgique. Ce projet s'inscrit aussi dans la perspective plus générale du développement d'un futur pôle européen de captage-transport-stockage de CO<sub>2</sub> à Dunkerque et en Mer du Nord.

<https://3d-ccus.com/>



#### Projet ADEME Sense : pour une surveillance efficace de la conformité des sites de stockage de CO<sub>2</sub>

Le projet SENSE a démarré en 2019 pour une durée de 4 ans. Il vise à développer des techniques de télédétection rapide adaptées aux spécificités des sites de stockage de CO<sub>2</sub> et des algorithmes d'interprétation innovants.



#### Projet ADEME REX CO<sub>2</sub> : pour la réutilisation des puits pétroliers pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>

Lancé en novembre 2019 pour une durée de trois ans, le projet européen REX-CO<sub>2</sub> (Re-using EXisting wells for CO<sub>2</sub> storage operations) vise à développer 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>.



#### Projet H2020 Subsurface Evaluation of CCS and Unconventional Risks (SECURE) : pour une surveillance des sites de stockage de CO<sub>2</sub>

Le projet SECURE, qui réunit 17 partenaires européens depuis 2018 pour une durée de 4 ans, vise à tester et à améliorer les technologies actuelles de surveillance en continu des sites de stockage de CO<sub>2</sub>.

<https://www.securegeoenergy.eu/>



## Projet H2020 Chinese-European Emission-Reducing Solutions (Cheers) : démonstration d'un procédé innovant de captage du CO<sub>2</sub> par combustion en boucle chimique

中欧污染物减排技术研究

Lancé début octobre 2017 pour cinq ans, le projet Cheers réunit neuf acteurs engagés de longue date sur la chaîne du CCUS. Il vise à démontrer une technologie innovante de combustion en boucle chimique permettant de capter, plus efficacement et à un coût plus compétitif, les émissions industrielles de CO<sub>2</sub>.

<https://cheers-clc.eu/>



## Projet H2020 ECCSELERATE : faciliter l'accès à la recherche sur le CCUS

Lancé en 2017, Eccselerate a pour objectif de promouvoir l'utilisation et d'assurer le fonctionnement durable à long terme d'ECCSEL, l'infrastructure de recherche européenne dédiée au captage, transport, utilisation et stockage du CO<sub>2</sub>.

<https://eccsel.org/about/eccselerate/>

## Éolien



### Projet H2020 HIPERWIND : réduire le coût de l'éolien marin



Le projet HIPERWIND (Highly advanced Probabilistic design and Enhanced Reliability methods for high-value, cost-efficient offshore WIND) a démarré en décembre 2020 pour une durée de trois ans et demi. Son ambition est de réduire significativement le coût des éoliennes marines en améliorant la précision des modèles numériques.

## Projet européen EOCOE II : le HPC au service des défis de la transition énergétique

Au sein d'EOCOE, centre d'excellence dédié à l'énergie, EOCOE II, lancé en 2017, 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 : l'éolien, la prévision météorologique, les nouveaux matériaux pour cellules photovoltaïques, les batteries et supercondensateurs, l'eau (géothermie et hydroélectricité) et la fusion.

## Géothermie



### Projet H2020 Geco : réduire les émissions de gaz non condensables des centrales géothermiques

Le projet européen Geco (Geothermal Emission Control), démarré en 2018, propose de développer des technologies innovantes destinées à réduire considérablement les émissions de gaz des centrales géothermiques. Les 17 partenaires industriels et académiques développent différentes approches qui seront testées sur quatre centrales pilotes en Europe.

<https://geco-h2020.eu/consortium/>



### Le Carnot IFPEN RE est membre de nombreux réseaux et plateformes européens

Dans le domaine du CCUS :

- **Zero Emissions Platform (ZEP)**

Plateforme européenne de technologie et d'innovation, conseil technique de l'UE pour le déploiement du CCUS.

- **CO2ValueEurope**, association européenne dédiée à la conversion et à la valorisation du CO<sub>2</sub>
- **CO2GeoNet**, organisme scientifique européen sur le stockage géologique du CO<sub>2</sub>
- **European Carbon dioxide Capture and Storage Laboratories (ECCSEL)**, réseau de recherche européen dans le domaine du CO<sub>2</sub>

Dans le domaine de la géothermie :

- **European Technology & Innovation Platform on Deep Geothermal (ETIP-DG)**

Plateforme technologique ouverte dont l'objectif est de permettre le développement de la technologie géothermique profonde en Europe.

Dans le domaine des énergies marines :

- **WECANet**

Réseau paneuropéen pour les énergies marines renouvelables avec un accent sur l'énergie houlomotrice

## SALONS ET MANIFESTATIONS 2020

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

**9 juin**

Back2Business



**EVOLEN**

**29 juin**

L'intelligence artificielle en géosciences



**14 - 17 septembre**

GEO 2020



**1<sup>er</sup> octobre**

Table ronde CCUS



**8 octobre**

Journée CO<sub>2</sub> industrie et territoire



**26 - 30 octobre**

Réunion des sciences de la terre de Lyon



**10 novembre**

Vers la neutralité carbone de l'Europe ?

**renew  
europe.**

**13 novembre**

ENR, stockage et gestion de l'énergie



**18-19 novembre**

RDV CARNOT & exposition virtuelle dédiée aux 15 ans des Carnot





## 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 : Eric Heintzé

+33 1 47 52 69 16 - [eric.heintze@ifpen.fr](mailto:eric.heintze@ifpen.fr)

**Maquette :** IFPEN

**Mise en page :** ExeAtelierTypao

**Photos :** © Adobe Stock, © Joulin, P. A., Mayol, M. L., Masson, V., Blondel, F., Rodier, Q., Cathelain, M., & Lac, C. (2020).

The Actuator Line Method in the meteorological LES model Meso-NH to analyze the Horns Rev 1 wind farm photo case.

Frontiers in Earth Science, 7, 350. Joulin, P. A., Mayol, M. L., Masson, V., Blondel, F., Rodier, Q., Cathelain, M., & Lac, C. (2020).

The Actuator Line Method in the meteorological LES model Meso-NH to analyze the Horns Rev 1 wind farm photo case. Frontiers in Earth Science, 7, 350 IFPEN, X. - **0621**