

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2021

CARNOT

IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES



SOMMAIRE

03

LE MOT DU DIRECTEUR

04

IFP ENERGIES NOUVELLES

05

IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES EN BREF

06

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

- CCUS : CAP SUR LA DÉMONSTRATION DES PROCÉDÉS
- DEUX CARNOT ET UNE GAMME D'OUTILS AU SERVICE DE LA QUALITÉ DE L'AIR
- CLIMAT, SOL ET CYCLE DE L'EAU : UNE MINE D'INTERACTIONS À EXPLORER
- ÉOLIEN ET ÉNERGIES MARINES : UN NOUVEAU SOUFFLE
- RESSOURCES ET USAGE DU SOUS-SOL POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : UNE PERCÉE DU DIGITAL
- DÉVELOPPEMENT DES SYSTÈMES DE STOCKAGE ET GESTION DE L'ÉNERGIE
- COMPRENDRE ET MODÉLISER LE SOUS-SOL
- RÉCUPÉRATION AMÉLIORÉE : UN IMPACT ENVIRONNEMENTAL RÉDUIT
- PRODUCTION OFFSHORE : LA MAÎTRISE DU FOND DES MERS

12

GRAND ANGLE :

- PROJET 3D POUR LA DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE ET LE CAPTAGE DE CO₂ POST-COMBUSTION

14

ACTIONS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET DE PROFESSIONNALISATION

16

RECHERCHE COLLABORATIVE

19

SALONS ET MANIFESTATIONS

LE MOT DU DIRECTEUR

2021 a signifié la deuxième année d'activités pour le Carnot IFPEN Ressources Energétiques dans un contexte sanitaire qui est resté complexe. Je tiens à remercier les équipes impliquées dans les projets de recherche partenariale pour leur engagement au service de l'innovation des entreprises au bénéfice de la double transition écologique et numérique.

2021 a également été marqué par le projet de construction d'une Alliance Carnot dédiée aux énergies à faible impact carbone en collaboration avec les Carnot Énergies du futur, Icéel, ISIFoR et M.I.N.E.S. Cette dernière a pour ambition d'anticiper les besoins des industriels et de répondre à leurs attentes. L'avenir proche nous permettra de consolider, entre Carnot, notre offre R&D et d'interagir ensemble au cœur des territoires.

Dans ce rapport annuel des activités du Carnot, outre un panorama des actions les plus représentatives, vous trouverez un « Grand angle » sur 3D (DMX™ Demonstration in Dunkirk), projet d'envergure visant à démontrer un procédé innovant de captage du CO₂ (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) et sur notre engagement collaboratif (voir page 16).

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

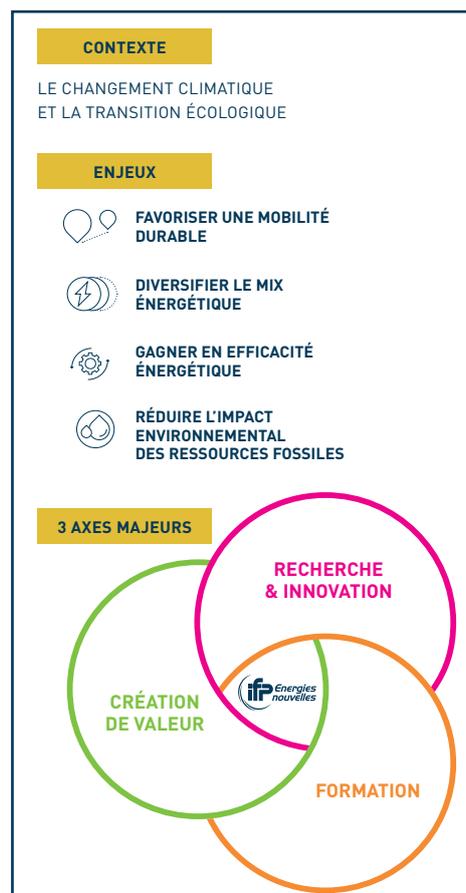
Le financement d'IFPEN est assuré à la fois par le budget de l'État et par des ressources propres provenant de partenaires industriels.

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 écologique. Au sein d'IFPEN Energies nouvelles, il offre à ses partenaires industriels des solutions innovantes afin de développer des énergies renouvelables compétitives pour décarboner le mix énergétique, de minimiser l'impact climatique des activités industrielles et de contribuer à produire, avec d'avantage de performance environnementale, 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 CO₂

Proposer des solutions plus respectueuses de l'environnement pour produire les hydrocarbures strictement nécessaires

- 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 ENERGETIQUES en 2021, c'est :

14 laboratoires de recherche représentant 442 ETP dont 44 doctorants et post-doctorants

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

21 contrats actifs de licences de technologies dont 16 avec des ETI/PME/TPE

27 projets de recherche collaborative auxquels contribuent 46 entreprises partenaires

23 brevets déposés dans l'année et 1298 détenus dans le portefeuille de brevets

68 publications de rang A

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

Fait marquant

Projet CHEERS : lancement de la construction du pilote CLC

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

Voir aussi page 17.

CCUS : cap sur la démonstration des procédés

Les travaux dans le domaine du captage, stockage et de la valorisation du CO₂ (CCUS) prennent une ampleur nouvelle dans un contexte européen de plus en plus dynamique. Deux procédés de captage sont en phase de démonstration, le procédé par solvant démixant DMX™, pour lequel un pilote a été livré sur le site d'ArcelorMittal à Dunkerque, et le procédé Cheers de combustion en boucle chimique (CLC) avec un démonstrateur en Chine. La démonstration de ces deux solutions sera lancée en 2022 et 2023. L'année 2021 a vu le lancement du projet PilotSTRATEGY sur l'évaluation des capacités de stockage des aquifères salins profonds, piloté par le BRGM. Par ailleurs, IFPEN élabore pour les pouvoirs publics et les industriels des stratégies de déploiement, ainsi que des études d'impact.

FOCUS

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

Fait marquant

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

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

Deux Carnot et une gamme d'outils au service de la qualité de l'air

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



INTERVIEW DE :

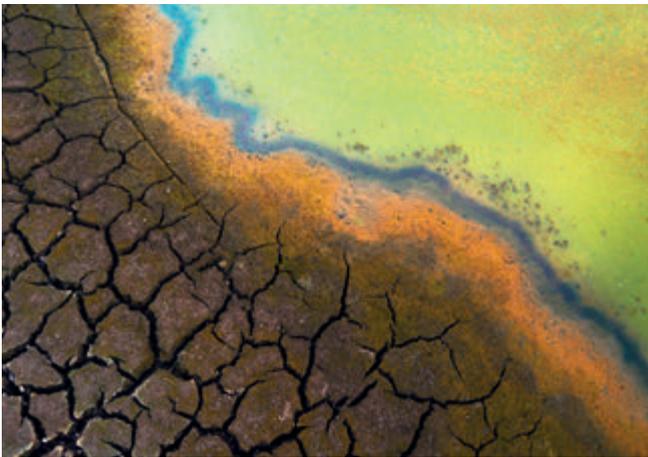
Pierre Chiquet,
responsable du service Géosciences de Teréga

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



Climat, sol et cycle de l'eau : une mine d'interactions à explorer

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



Éolien et énergies marines : un nouveau souffle

L'éolien offshore est fortement encouragé par l'Union européenne qui a réaffirmé en novembre 2021 l'ambition d'en faire une énergie majeure, avec l'objectif de disposer d'une puissance installée de 60 GW dès 2030 et d'au moins 300 GW en 2050. Porté par cet élan, le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques a intensifié ses efforts sur la conception de flotteurs, le contrôle d'éoliennes et de parcs éoliens et le développement d'un jumeau numérique qui optimise la production et la maintenance d'un parc d'éoliennes.

Par ailleurs, les recherches sur le contrôle des systèmes houlomoteurs se sont poursuivies avec une étude pour la société *Carnegie Clean Energy* sur le contrôle du module CETO.



Fait marquant

Deux projets pour comprendre le rôle des microplastiques dans les sols

Les projets sélectionnés en 2021 par l'ANR et l'ADEME vont permettre d'étudier l'impact de la présence des microplastiques (MP) dans les sols. Le projet e-DIP, financé par l'ANR, évaluera la toxicité des MP dans les différents compartiments du sol et leur impact sur les cycles biogéochimiques suivant qu'ils sont apportés directement ou mélangés à des amendements organiques. Le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques étudiera l'impact direct ou indirect (en perturbant l'activité microbienne) des MP sur la qualité de la matière organique des sols en utilisant les méthodes Rock-Eval® dédiées aux études des sols. Le projet Plastisol, financé par l'ADEME, complètera cette étude en fournissant des indicateurs de la présence de matières plastiques dans les sols.

Fait marquant

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

Le Carnot IFPEN Ressources Énergétiques et TotalEnergies ont mis en commun leurs efforts pour évaluer l'impact du mouvement d'une éolienne flottante sur sa production d'énergie. Deux types de flotteurs ont été pris en compte et une comparaison a été faite avec le cas d'une éolienne fixe. Les écarts ont été quantifiés et leurs causes analysées.

Ces travaux ont été réalisés à l'aide des outils de modélisation développés à IFPEN, notamment DeepLines Wind™ pour la simulation multiphysique d'une éolienne flottante.

Fait marquant

WiSE WindField : une prédiction plus précise du vent

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

Fait marquant

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

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



Fait marquant

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

En collaboration avec Engie Green et Engie Digital, les équipes du Carnot IFPEN Ressources Energétiques ont développé un *Digital Twin* (jumeau numérique) de la ferme d'éoliennes « La Sole du Moulin Vieux » dans les Hauts-de-France, pour laquelle des données sur 11 ans sont disponibles. Grâce à des algorithmes mêlant modélisation physique et science des données, l'usure mécanique des composants des éoliennes (pales, mât et rotor) a été estimée.

Ces algorithmes, validés par des mesures sur site, donnent des indicateurs clés de performance comme l'estimation des charges subies par les composants, et de leur durée de vie, permettant ainsi de détecter des défaillances ou des sous-performances. Ce jumeau numérique a donné lieu à un nouvel outil : Wind Avatar®.



Ressources et usages du sous-sol pour la transition énergétique : une percée du digital

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



Fait marquant

TELLUS : les technologies du digital au service des géosciences

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



Fait marquant

IFPEN partenaire de l'institut de la Corrosion

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

Fait marquant

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

Le projet TranZAE, attribué par l'ADEME en 2021 et porté par CSTB, dont le Carnot Ressources Energétiques est partenaire avec le Cerema et Enedis, va proposer une méthodologie destinée à l'ADEME pour décarboner et revitaliser les 10 000 à 20 000 ZAE (bureaux, commerces, PME) de France, en produisant de l'énergie renouvelable dans le cadre de l'autoconsommation collective.

Une base de données intégrant des données cadastrales fournies par IGN et des données électriques fournies par Enedis sera traitée par un moteur de recherche créé par IFPEN, pour recenser et classer les zones à fort potentiel photovoltaïque, stockage stationnaire et bornes de charge, en intégrant les coûts des technologies, de l'électricité et des services réseau.

Développement des systèmes de stockage et gestion de l'énergie

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



Fait marquant

IFPEN organise un workshop international sur la modélisation de bassin

La deuxième édition du *workshop* « Basin Modeling » organisé par le Carnot IFPEN Ressources Energétiques a réuni plus d'une centaine d'experts d'une vingtaine de pays et a permis de faire un état des lieux des différents axes de recherche de la discipline. Une attention particulière a été accordée à la mise en œuvre de nouvelles méthodologies de travail, aux thématiques de la perméabilité et des écoulements dans les failles et fractures, ainsi qu'à des problématiques multi-physiques et multi-échelles. Une session spécifique était dédiée à la transition énergétique.

Comprendre et modéliser le sous-sol

Dans le contexte actuel de la transition énergétique, les industriels s'efforcent de minimiser les risques et les impacts environnementaux, en mettant en œuvre des moyens efficaces pour explorer, caractériser et produire les ressources du sous-sol. À l'échelle du bassin, le Carnot IFPEN Ressources Energétiques renforce la capacité explicative et prédictive de la modélisation pour comprendre l'évolution dynamique du sous-sol sur les temps géologiques et gérer les incertitudes, dans le but d'identifier les opportunités de forage, d'estimer le potentiel en hydrocarbures, de localiser les gisements et de diminuer le risque en exploration. À l'échelle du réservoir, les efforts portent sur la modélisation des phénomènes complexes afin de caractériser et mieux maîtriser la production.



Récupération améliorée : un impact environnemental réduit

La récupération améliorée des hydrocarbures (EOR : *Enhanced Oil Recovery*) permet de répondre à la demande en augmentant la production des réservoirs existants, en limitant les forages et en optimisant la gestion des eaux de production. Dans ce domaine, IFPEN, Beicip-Franlab et Solvay développent, au sein de l'Alliance EOR, des technologies adaptées à différents types de réservoir et de procédés EOR, depuis la recherche de formulations en laboratoire jusqu'à l'expérimentation sur champ. Le JIP DOLPHIN 3, démarré fin 2019 avec six opérateurs pétroliers et axé sur la limitation de l'impact environnemental de l'EOR, poursuit ses activités avec la réalisation de tests de l'unité de traitement des eaux sur la plateforme IFPEN de traitement des eaux industrielles.



Production offshore : la maîtrise du fond des mers

L'offshore, qui représente un tiers de la production d'hydrocarbures, a connu une baisse d'activité en 2021. Néanmoins, l'industrie y rencontre des problèmes qui demeurent critiques, comme les fortes sollicitations mécaniques en profondeur, la corrosion due aux fluides extraits, la survenue de bouchons d'hydrates ou de paraffines, le mélange de fluides en composition variable à pomper et parfois à séparer en fond de mer, ou encore le coût des installations.

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

Fait marquant

Partenariat avec OneSubsea : tests sur une pompe polyphasique

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



Le Projet 3D pour la décarbonation de l'industrie et le captage de CO₂ post-combustion

Le projet 3D (*DMX™ Demonstration in Dunkirk*) vise à démontrer un procédé innovant de captage du CO₂ des fumées industrielles et à initier le développement du futur cluster européen de Dunkerque pour le captage et le stockage en mer du Nord. En décembre 2021, une étape clé a été franchie : le pilote de démonstration du procédé DMX™ a été installé sur le site sidérurgique d'ArcelorMittal à Dunkerque. Le projet 3D, lancé en 2019, va se poursuivre jusqu'en 2023. Ce projet, financé par le programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne Horizon 2020, réunit douze acteurs européens de la recherche et de l'industrie. Il est coordonné par une équipe du Carnot IFPEN Ressources Énergétiques.



Projet ayant 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 captage du CO₂ dans les fumées d'usines doit permettre à l'industrie de réduire ses rejets de CO₂ dans l'atmosphère, qu'il s'agisse de centrales électriques au charbon, au gaz ou au fioul, de complexes sidérurgiques ou pétrochimiques, de cimenteries, de raffineries, etc. La technique de captage la plus utilisée aujourd'hui consiste à mettre les fumées en contact avec un solvant chimique qui absorbe le CO₂. Le CO₂ solvant est ensuite extrait du solvant par un procédé thermique consommateur en énergie. Le procédé DMX™ breveté IFPEN qui fait l'objet de la démonstration du projet 3D requiert moins d'énergie que les solvants de référence. En effet, sa consommation énergétique est estimée entre 2,3 et 2,9 gigajoules (GJ) par tonne de CO₂ capté, alors que les procédés classiques consomment plutôt 3,2 GJ/tCO₂. La récupération de la chaleur produite sur le site d'Arcelor Mittal permet encore de réduire le coût du captage.

Rappel

L'Union européenne s'est fixée comme objectif, à travers la loi Climat du 30 juin 2021, de réduire de 55 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à 1990, l'objectif final étant de parvenir à la neutralité climatique en 2050, enjeu majeur du Pacte vert pour l'Europe.

Pour atteindre la neutralité climatique, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) met l'accent sur les technologies de captage et stockage du CO₂. Le rapport du GIEC publié en avril 2022 encourage l'accélération du déploiement de la filière afin de pouvoir limiter le changement climatique à 1,5 °C.



La décarbonation à Dunkerque va se jouer en plusieurs manches

Le démonstrateur mis en œuvre dans le cadre du projet 3D captera 0,5 tonne de CO₂ par heure soit 4 000 tonnes par an. Le projet 3D inclut aussi le design d'une unité industrielle qui pourrait capter 125 tonnes de CO₂ par heure, soit un million de tonnes de CO₂ par an.

Un futur cluster européen Mer du Nord à Dunkerque est aussi à l'étude dans le cadre de ce projet. Il pourrait capter sur le Dunkerquois, conditionner, transporter et stocker 10 millions de tonnes de CO₂ par an à horizon 2035. Le transport du CO₂ se ferait par pipeline ou par bateau jusqu'au site de stockage définitif dans d'anciens champs de gaz ou des aquifères salins profonds.

DMX™ : un astucieux mélange d'amines permettant d'absorber et séparer de CO₂ des fumées

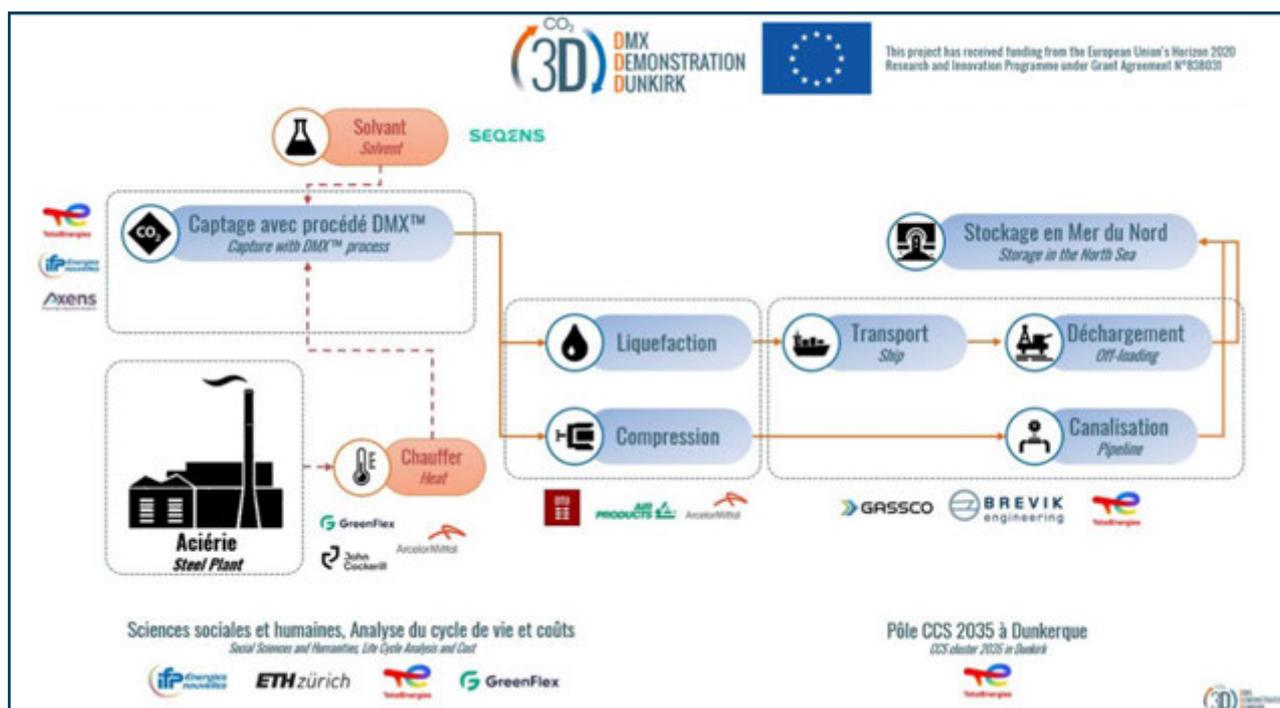
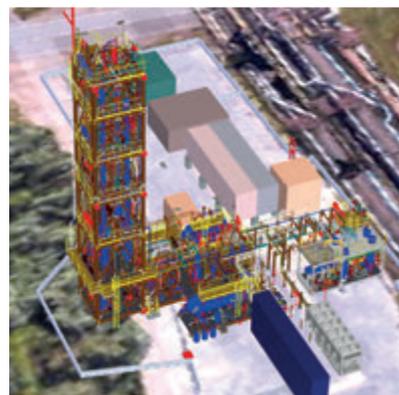
Issu d'une décennie de recherche, le procédé DMX™ a été mis au point dans les laboratoires et sur les pilotes d'IFPEN-Lyon. L'originalité de ce procédé réside dans un solvant dit démixant, qui, non seulement possède un grand pouvoir de captation, mais aussi se scinde en deux phases non miscibles lors de l'absorption du CO₂ contenu dans les fumées. Le CO₂ est ainsi concentré dans une des deux phases qui est régénérée en utilisant de la vapeur d'eau à 130 °C. Le CO₂ récupéré est très pur (99,7 %) et produit sous pression (jusqu'à 7 bars), ce qui facilite la compression nécessaire pour son futur transport.

Le démonstrateur du procédé DMX™ prend ses marques à Dunkerque

Le pilote de démonstration du procédé DMX™ a été livré et monté sur le site d'ArcelorMittal à Dunkerque en décembre 2021. Aboutissement d'un long programme de recherche, cette tour, haute de 22 m., conçue par IFPEN et Axens, a été réalisée dans les ateliers d'ETCI (Entreprise tuyauterie chaudronnerie industrielle) à Lens.

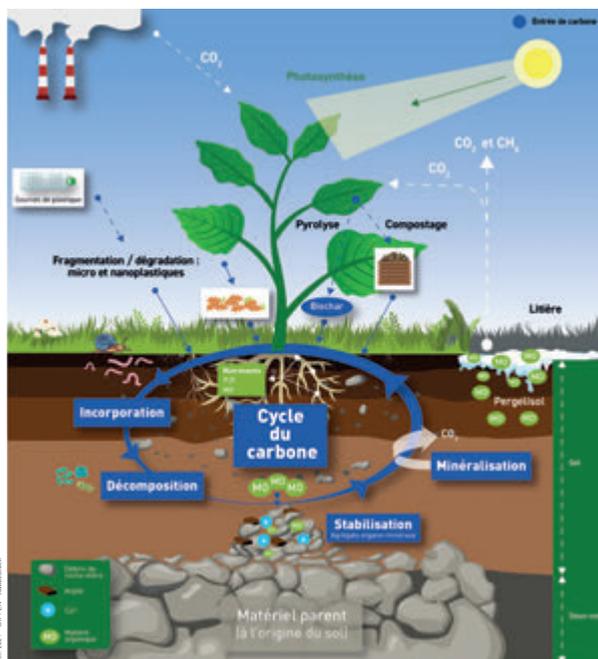
La construction a été finalisée, le raccordement à l'usine effectué et l'unité va pouvoir démarrer.

La prochaine étape sera la démonstration des performances du procédé DMX™ à l'échelle du pilote industriel sur le site sidérurgique d'Arcelor Mittal de Dunkerque. Les équipes de recherche présentes sur ce site industriel quantifieront l'efficacité énergétique du procédé et la vitesse de dégradation du solvant pendant 12 à 18 mois. A l'issue de cette évaluation, la technologie, commercialisée par Axens, sera prête pour un déploiement industriel.



ACTIONS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET DE PROFESSIONNALISATION

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



Quantifier précisément les formes de carbone organique des sols avec l'outil Rock-Eval®

Rock-Eval® est un équipement du Carnot leader sur son marché, historiquement développé pour caractériser la matière organique fossile via des méthodes thermiques. L'abondement Carnot a permis en 2021 une première adaptation des protocoles analytiques avec la mise au point de méthodes d'interprétation des données issues du Rock-Eval® sur des sols agricoles tempérés et des tourbes. Cette adaptation a permis le dépôt de deux brevets en 2021.

La nouvelle méthode proposée, basée sur l'ensemble des effluents émis lors de l'analyse Rock-Eval®, permet désormais de calculer le contenu en carbone organique de manière plus fiable et plus précise, grâce à une estimation objective et déterministe de la présence de formes minérales de carbone sans analyse de calcimétrie complémentaire. Cette nouvelle approche a depuis été appliquée pour étudier l'impact de procédés de réhabilitation de sols sur la matière organique ou pour caractériser des mélanges biochar-composts.

Réduire le coût du captage du CO₂ par des technologies en rupture

À l'heure où les procédés de captage de CO₂ de seconde génération arrivent sur le marché, leur performance demeure un enjeu. Dans ce contexte, le Carnot investit deux axes de progrès que sont la mise au point d'une part de simulateurs numériques au service du développement d'équipements compacts et d'autre part de solvants éco-efficaces. En 2021, la modélisation CFD des contacteurs gaz/liquide rotatifs a permis de concevoir un modèle hydrodynamique diphasique représentatif afin de pouvoir disposer à terme d'un modèle numérique en soutien aux premières expérimentations. Concernant les solvants éco-efficaces, une quarantaine de composés intéressants ont été investigués et une demande de brevet est en cours.



Simuler le fonctionnement des éoliennes en mer via un outil d'exception conçu en France

La baisse des coûts de l'éolien en mer repose sur une meilleure compréhension et modélisation des phénomènes physiques mis en jeu. Pour atteindre cet objectif, l'outil FarmShadow™ porté par le Carnot permet d'optimiser le design des fermes d'éoliennes (modélisation des effets de sillage, optimisation du placement des éoliennes dans une ferme, ...). Depuis 2021, l'outil open source MESO-NH développé par le Centre national de recherches météorologiques intègre les développements réalisés par le Carnot lui permettant de simuler une ou plusieurs éoliennes. Cet outil, français, devient ainsi l'un des rares outils haute-fidélité, au niveau mondial, à pouvoir simuler l'interaction d'une ferme d'éolienne avec les aspects météorologiques et la prise en compte de la couche limite atmosphérique. Les résultats obtenus avec cette nouvelle version de MESO-NH ont permis d'améliorer la modélisation de la dynamique des sillages dans FarmShadow™ et ainsi, une meilleure prédiction de l'énergie annuelle produite ainsi que de la charge subie par chaque éolienne.



Piloter les systèmes de stockage de l'électricité issues d'une production renouvelable

Les parcs de production photovoltaïque et éolien soulèvent des enjeux de flexibilité du réseau électrique en raison de leur caractère non pilotable. Dans ce contexte, les travaux menés par le Carnot en 2021 ont permis d'avancer sur deux aspects. En premier lieu, des algorithmes liés à la planification et au contrôle temps-réel de systèmes de stockage et à la prévision de la flexibilité ont été développés. En second lieu, un système d'information versatile capable de s'interfacer et de piloter à distance des batteries, accessibles à des entreprises extérieures, a fait l'objet de nouvelles avancées. Hébergé sur le cloud, il a été rendu compatible dataconnect Enedis, permettant ainsi le suivi des données de consommation, hébergées dans une base de données RGPD et a fait l'objet d'un déploiement pilote sur le site d'IFPEN-Lyon.



OUVERTURE INTERNATIONALE

Le Carnot IFPEN Ressources Energétiques 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. Il dispose de relations privilégiées avec de nombreux *Research Technology Organisations* (RTO) et 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.

RÉSEAUX ET PLATEFORMES EUROPÉENS

Captage, stockage et utilisation du CO₂

- **Zero Emissions Platform (ZEP)** Plateforme européenne de technologie et d'innovation, conseil technique de l'UE pour le déploiement du CCUS.
- **CO₂ ValueEurope**, association européenne dédiée à la conversion et à la valorisation du CO₂
- **O₂ GeoNet**, organisme scientifique européen sur le stockage géologique du CO₂
- **European Carbon dioxide Capture and Storage Laboratories (ECCSEL)**, réseau de recherche européen dans le domaine du CO₂

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.

Energies marines

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

PROJETS COLLABORATIFS AVEC SOUTIENS PUBLICS

Captage, stockage et utilisation du CO₂

Projet ADEME dynamX : démonstration sur un pilote industriel du procédé DMX™



Coordonné par Axens, le projet dynamX « Démonstration et applications innovantes du DMX™ » a été lancé avec la participation d'ArcelorMittal France, IFPEN et TotalEnergies. Soutenu par l'Ademe, dynamX étudie l'applicabilité de la technologie de décarbonation du gaz de haut-fourneau, DMX™ à de nouveaux types d'émetteurs industriels de CO₂. En 2021 la société belge Lhoist a rejoint le projet.



Ce projet est soutenu par le Programme d'investissements d'avenir (PIA) opéré par l'ADEME et porté par le Carnot Ressources Energétiques.

Projet H2020 Sun2Chem : pour une réduction efficace des émissions de CO₂ grâce à l'énergie solaire



Sun2Chem vise à développer des solutions pour une réduction efficace des émissions de CO₂ grâce à l'énergie solaire. L'objectif est la transformation du CO₂ en éthylène.



Ce 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.

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



Strategy CCUS 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/>



Ce 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° 837754.



Projet H2020 PilotSTRATEGY : développement du CCUS en Europe du Sud et de l'Est



PilotSTRATEGY, prolongement du projet StrategyCCUS, a été lancé en 2021 pour cinq ans. Il est coordonné par le BRGM et mené avec 16 autres partenaires. Le projet vise à caractériser cinq régions en Europe comme zones potentielles de stockage géologique de CO₂. L'objectif pour les trois premières régions est la réalisation d'études préliminaires nécessaires à l'implémentation d'un pilote de stockage de CO₂. Les travaux du Carnot concernent le site pilote français localisé dans le Bassin parisien.

<https://pilotstrategy.eu/>



Ce 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°101022664.

Projet 3D : captage de CO₂ sur le site sidérurgique d'ArcelorMittal à Dunkerque



3D (DMX™ Demonstration in Dunkirk) réunit 11 partenaires et est piloté par le Carnot IFPEN RE. Le projet vise à faire la démonstration industrielle du procédé DMX™ développé par le Carnot sur un site sidérurgique.

> Voir page 12

Projet ADEME Sense : pour une surveillance efficace de la conformité des sites de stockage de CO₂



Le projet SENSE vise à développer des techniques de télédétection rapide adaptées aux spécificités des sites de stockage de CO₂ et des algorithmes d'interprétation innovants.

Projet ADEME REX CO₂ : pour la réutilisation des puits pétroliers pour le stockage géologique du CO₂



REX-CO₂ (Re-using EXisting wells for CO₂ 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 CO₂.

<https://www.rex-co2.eu/>

Projet H2020 Subsurface Evaluation of CCS and Unconventional Risks (SECURE) : pour une surveillance des sites de stockage de CO₂



SECURE, qui réunit 17 partenaires européens, vise à tester et à améliorer les technologies actuelles de surveillance en continu des sites de stockage de CO₂.

<https://www.securegeoenergy.eu>

Projet H2020 Chinese-European Emission-Reducing Solutions (Cheers) : démonstration d'un procédé innovant de captage du CO₂ par combustion en boucle chimique



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 CO₂.

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



Ce 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°764697.

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



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 CO₂.

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



Ce 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°101022664.

Éolien

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



HIPERWIND (*Highly advanced Probabilistic design and Enhanced Reliability methods for high-value, costefficient offshore WIND*) a pour ambition de réduire significativement le coût des éoliennes marines en améliorant la précision des modèles numériques.

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



Ce 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° 101006689.

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



Au sein d'EOCOE, centre d'excellence dédié à l'énergie, EOCOE II 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.

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



Ce 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° 824158.

Géothermie



Projet européen DEEPEN : développer la géothermie en contexte magmatique et contrôler les risques



Pour développer la géothermie en contexte magmatique et en contrôler les risques, le projet DEEPEN (*DErisking Exploration for geothermal Plays in magmatic Environments*), coordonné par l'industriel islandais Reykjavik Energy, a été lancé par le consortium européen Geothermica en janvier 2021 pour une durée de 3 ans. DEEPEN vise à adapter l'approche *Play Fairway Analysis* à la géothermie classique et non-conventionnelle (supercritique) en contexte magmatique. Les équipes d'IFPEN mettront en place une méthodologie pour évaluer le risque de dépôts minéraux dans les puits de production.

<https://www.or.is/en/about-or/innovation/deepen/>

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



Geco (Geothermal Emission Control), 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/>



Ce 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° 818169

Sols



Le consortium VULCAR-FATE et la préservation de la biosphère



Le projet international VULCAR-FATE (*Global change impact on vulnerable carbon reservoirs: carbon sequestration and emissions in soils and waters From the Arctic To the Equator*) a été lancé en juin 2021 dans le cadre de l'appel à projets du Belmont-Forum « Vers la durabilité des sols et des eaux souterraines pour la société ». Financé par l'ANR,

la *National Science Foundation* et la *Russian Foundation for Basic Research*, et coordonné par l'IRD, il étudie deux écosystèmes et y évalue l'impact des changements climatiques récents et des usages des sols. Objectif : définir des scénarios d'évolution à 30-100 ans afin d'adapter les politiques locales.

<https://vulcar-fate.obs-mip.fr/>

SALONS ET MANIFESTATIONS 2021

Mars-Octobre 2021

Congrès mondial de la géothermie



7-8 avril

Sommet Saudi Energy Meet



15 juin

RDV Clients GRT Gaz



28 septembre

Cap'Carnot



15-18 novembre

ADIPEC



17-18 novembre

RDV Carnot



23-25 novembre

Wind Europe Electric city



Maquette : IFPEN

Mise en page : ExeAtelierTypao

Photos : © Adobe Stock, IFPEN, X. - 0622

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2021



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