

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2023

CARNOT

IFPEN RESSOURCES ENERGETIQUES



Page

SOMMAIRE

03

LE MOT DU DIRECTEUR

04

IFP ENERGIES NOUVELLES

05

LE CARNOT IFPEN RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES EN BREF

06

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

- ÉOLIEN ET ÉNERGIES MARINES
- RESSOURCES ET USAGES DU SOUS-SOL POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE
- STOCKAGE ET GESTION DE L'ÉNERGIE
- CO₂ : CAPTAGE, STOCKAGE & ÉMISSIONS NÉGATIVES
- MITIGATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES SYSTÈMES NATURELS

10

GRAND ANGLE

- LA NAISSANCE DE GREENWITS CONSACRE 12 ANS DE RECHERCHE EN R&I SUR L'ÉOLIEN

12

ACTIONS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET DE PROFESSIONNALISATION

16

UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

18

SALONS ET MANIFESTATIONS 2023

LE MOT DU DIRECTEUR



En 2023, les équipes du Carnot IFPEN Ressources Energétiques (IFPEN RE) ont continué d'accompagner l'évolution des systèmes énergétiques en déployant de solutions innovantes au plus près des besoins de la triple transition écologique, énergétique et numérique.

Outre l'entrée du Carnot IFPEN RE au conseil d'administration de l'Association des Carnot et des actions de ressource scientifique conjointes avec les Carnot Icel et Isifor notamment, l'année 2023 a été celle d'un renforcement de nos liens avec l'écosystème Carnot, en particulier avec les membres du réseau des Carnot Energies à faible impact carbone (EFIC) : Énergies du futur, Icél, ISIFoR et M.I.N.E.S. Cette collaboration toujours plus étroite a notamment conduit à l'organisation concertée

des Rencontres EcoTech Energies 2023 qui ont réuni les acteurs français de la transition énergétique à Paris autour des enjeux des ressources dans les systèmes énergétiques, ainsi qu'à la mise en place des « Cafés Carnot Energies » sur des thématiques ciblées, ce qui a permis aux chercheurs des cinq Carnot de mieux se connaître et identifier à terme de nouvelles opportunités de collaboration.

Ce rapport annuel dresse le tableau des actions les plus représentatives et de notre engagement collaboratif. Vous y trouverez notamment un « Grand angle » sur la naissance de GreenWITS, nouvelle filiale d'IFPEN dédiée à l'éolien (voir page 10). Retrouvez également un point sur les actions de ressource scientifique et de professionnalisation qui ont pu être boostées par l'abondement Carnot (voir page 12).

Bonne lecture !

Benjamin Herzhaft

Directeur du Carnot IFPEN Ressources Energétiques

IFP ENERGIES NOUVELLES



IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, de la mobilité 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.

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 triple transition écologique, énergétique et numérique. 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.

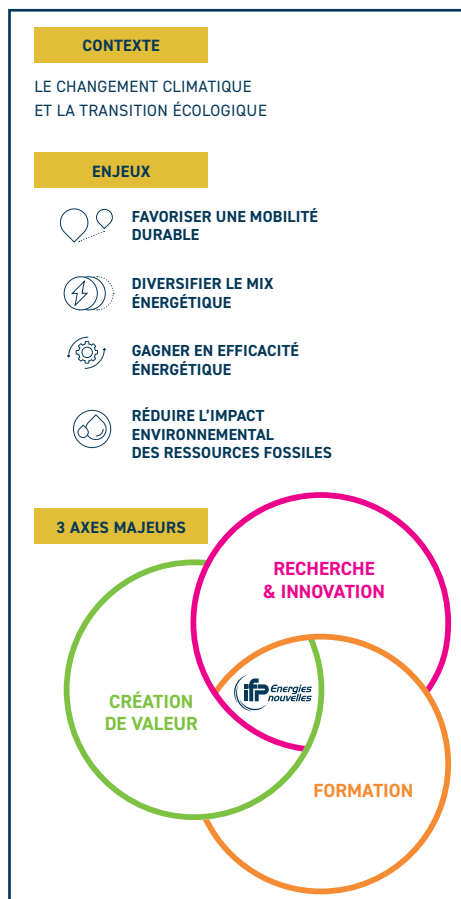
Les projets sont souvent menés dans un cadre collaboratif avec des partenaires académiques et industriels.

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 et de l'énergie.

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.

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



LA CRÉATION DE VALEUR

IFPEN contribue à la création de richesse et d'emplois, en favorisant le développement économique des filières liées aux secteurs de la mobilité, de l'énergie et des éco-industries. Le modèle d'IFPEN repose sur la valorisation des innovations développées par ses chercheurs. La mise sur le marché se fait via les filiales de son groupe et au travers de partenariats étroits avec des industriels. 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 délivre ainsi tous les ans plus de 500 étudiants issus du monde entier.

LE CARNOT IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES EN BREF



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

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

Développer les énergies renouvelables

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

Minimiser l'impact climatique des activités industrielles

- Valoriser le captage, stockage et valorisation du CO₂ (ou CCUS en anglais)
- Surveiller les sites industriels : détecter les fuites de gaz, remonter à l'origine
- Comprendre le rôle des sols en tant que puits de carbone
- Gérer et traiter la ressource en eau
- Caractériser les microplastiques dans l'environnement

Saisir les opportunités offertes par le digital

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

Le Carnot IFPEN RESSOURCES ENERGETIQUES en 2023, c'est :

14 laboratoires de recherche représentant 437 ETP dont 55 doctorants et post-doctorants

92 contrats de recherche contractuelle dont environ 40 % à l'international

25 contrats actifs de licences de technologies dont 20 avec des ETI/PME/TPE

35 projets de recherche collaborative auxquels contribuent 39 entreprises partenaires

25 brevets déposés dans l'année et 1 200 détenus dans le portefeuille de brevets

59 publications de rang A

ACTIVITÉS ET FAITS MARQUANTS DE L'ANNÉE

Énergies renouvelables

Éolien & énergies marines

Les compétences historiques du Carnot IFPEN RE en conception d'équipements offshore et en contrôle avancé lui ont permis de se positionner rapidement sur l'activité éolienne offshore avec des offres différenciantes qui se sont concrétisées en 2023. En effet, la création de sa filiale GreenWITS et la mise à l'eau des trois éoliennes du projet Provence Grand Large sont des événements marquants pour la filière. Autre fait notable : le démarrage du consortium avec des partenaires industriels WIND AVATAR, qui vise à développer et qualifier une solution associant modélisation physique et sciences des données pour surveiller les actifs éoliens flottants.



Fait marquant

GreenWITS : répondre aux ambitions du secteur dès maintenant

En mai 2023 est née GreenWITS (Voir Grand Angle page 10),

Une filiale d'IFPEN qui offre des services numériques avancés aux développeurs et exploitants de projets sur quatre secteurs d'activité : la conception de parcs, la conception des éoliennes flottantes, le *monitoring* digital des éoliennes et le contrôle des parcs éoliens. GreenWITS est le fruit d'une longue maturation technologique et peut contribuer aux fortes ambitions européennes dans le domaine. À noter : GreenWITS a reçu le prix de l'innovation 2023 remis par Evolen pour son offre de contrôle des éoliennes à l'échelle du parc.

FOCUS

IFPEN et GreenWITS ont été les invités principaux du plateau du média éducatif l'Esprit Sorcier TV qui a consacré un épisode de « Science en questions » sur les enjeux, les défis et les ambitions françaises pour le déploiement de l'éolien.

À retrouver sur YouTube !

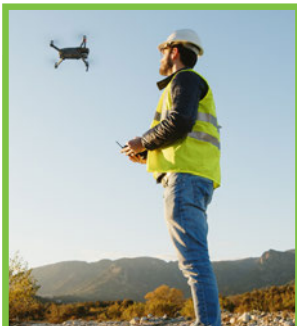
Fait marquant

Installation du premier parc éolien flottant en Méditerranée

L'année 2023 a marqué le franchissement d'une nouvelle étape dans l'éolien offshore avec l'installation complète des trois flotteurs du parc Provence Grand Large, le premier parc éolien flottant au large des côtes méditerranéennes françaises. Ces flotteurs, conçus par SBM Offshore en partenariat avec les équipes du Carnot IFPEN RE, mettent en œuvre la technologie « à lignes d'ancrage tendues » et constituent une véritable innovation technologique en raison de leur grande stabilité et de la possibilité de les déployer dans des zones à fortes profondeurs. Un nouvel exemple de valorisation du savoir-faire du Carnot en matière de simulation : les calculs multiphysiques ont été réalisés à l'aide du logiciel DeepLines Wind codéveloppé par IFPEN et Principia. Cette réalisation démontre le soutien du Carnot à des applications concrètes au service de la transition énergétique et aux objectifs français et européens dans le domaine de l'éolien.

Ressources et usages du sous-sol pour la transition énergétique

Les enjeux du sous-sol, stratégiques pour l'exploitation de ressources (chaleur, hydrogène, fluides hydrothermaux/métaux, etc.) et pour le stockage massif de fluides, ont très tôt intéressé le Carnot IFPEN RE. La récente actualité a notamment fait la part belle à l'hydrogène naturel, ressource qui motive les chercheuses et chercheurs d'IFPEN depuis plus de 15 ans. Ses équipes en étudient les émanations en différents endroits à la surface de la terre, en quantifient les ressources disponibles en travaillant à mieux comprendre les processus de transformation de l'eau en hydrogène dans les profondeurs.



Fait marquant

Hydrogène naturel : l'origine et le comportement de l'hydrogène géologique à la loupe

Remontant à 2008, les premiers travaux d'IFPEN ont permis de révéler que l'hydrogène naturel se rencontre de manière préférentielle dans plusieurs types d'environnements géologiques. Aujourd'hui, les équipes du Carnot IFPEN RE visent à mieux comprendre les mécanismes de formation de l'hydrogène en profondeur ainsi que ceux qui dégradent l'hydrogène au cours de sa migration vers la surface (transformations géochimiques ou consommation par des micro-organismes). En rassemblant ces résultats, les travaux du Carnot visent à développer des outils d'exploration

géologique permettant aux industriels de bénéficier de méthodes de quantification des ressources et des réserves potentielles en hydrogène naturel. Ces travaux s'appuient notamment sur une collaboration avec la chaire ORHYON (micro-Organismes et Réactivité de l'HYdrOgène dans le sous-sol) démarrée en 2022 et qui vise à étudier le comportement de l'hydrogène dans le sous-sol, en partenariat avec l'Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux (UMR CNRS / UPPA 5254), l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, ENGIE et ses filiales Storengy et BU-Brazil. Par ailleurs, un accord cadre a été signé avec le Carnot Isifor sur cette thématique. Des connaissances pour mieux comprendre le potentiel de l'hydrogène géologique afin de contribuer à un système énergétique plus durable.

Fait marquant

Brevets : IFPEN 2^e du classement mondial des organismes de recherche sur les technologies de l'hydrogène

L'étude *Hydrogen patents for a clean energy future*, menée conjointement par l'Office européen des brevets (OEB) et l'Agence internationale de l'énergie (AIE), est parue en janvier 2023.

Cette étude présente les grandes tendances des technologies de l'hydrogène pour la période 2011-2020, mesurées en termes de familles internationales de brevets (FBI). Elle couvre une large gamme de technologies, de l'approvisionnement en hydrogène au stockage, pour la distribution et la transformation ainsi que les applications finales. IFPEN se positionne à la deuxième place au niveau mondial dans le classement des organisations de recherche publique ayant déposé le plus de demandes de brevets à l'international, dans le domaine des technologies H₂.

Les brevets portent sur la production d'hydrogène décarboné par CCS, la recherche de matériaux de substitution aux catalyseurs utilisés dans les réactions électrochimiques, la tenue des matériaux lors du transport et du stockage de l'hydrogène, son utilisation pour une mobilité décarbonée (PàC, moteur à combustion interne, carburants bas carbone : *e-fuels* et notamment *e-biofuels*).

Fait marquant

GLITER : évaluer le potentiel de coproduction géothermie et lithium du fossé rhénan

Coordonné par le BRGM – et intégrant le Carnot IFPEN RE, Lithium de France, CGG et l'université Paris Sorbonne – le projet ANR GLITER vise à évaluer les ressources en lithium des eaux géothermales du fossé rhénan. GLITER permettra dans un premier temps de travailler sur l'évolution tectonique du fossé rhénan et son impact sur les propriétés d'écoulement, puis de prendre en compte cette évolution structurale et les roches sources de lithium dans la modélisation de bassin pour évaluer la distribution actuelle du lithium dans les eaux géothermales. Enfin, une modélisation des écoulements dans ces réservoirs fracturés visera à évaluer l'évolution de la concentration en lithium dans les eaux produites et permettra d'effectuer des recommandations sur le positionnement des puits et sur les acquisitions à réaliser pour réduire les incertitudes et mieux appréhender le caractère économique de la production.





Stockage et gestion de l'énergie

À l'heure du déploiement toujours plus important des énergies renouvelables, le Carnot IFPEN RE continue de répondre aux besoins accrus de flexibilité et de stabilité des réseaux électriques et des réseaux de chaleur avec des technologies de stockage massif d'électricité et des solutions numériques de gestion de l'énergie (EMS). Le Carnot a approché en 2023 plusieurs partenaires, dont Soalis installateur de panneaux photovoltaïques et Urban Solar Energy agrégateur et spécialiste de l'énergie solaire, afin de travailler à déployer l'offre de pilotage de batteries par l'EMS d'IFPEN pour différents usages et services. Le Carnot IFPEN RE a également renforcé sa collaboration avec la start-up industrielle STOLECT qui met en œuvre sa technologie de batterie Carnot.



INTERVIEW DE :

Jean-François Le Romancer,
président de STOLECT



La start-up STOLECT s'est tournée vers le Carnot IFPEN RE pour accélérer et fiabiliser le développement de notre solution de stockage d'électricité à grande échelle : une « batterie de Carnot » produisant de l'air chaud, qui peut être stocké dans un matériau réfractaire puis déstocké pour entraîner une turbine électrique. Positionnées sur différentes technologies de stockage et de gestion d'énergie, brique fondamentale pour accompagner le déploiement des énergies renouvelables chères à IFPEN, ses équipes disposent aujourd'hui de solides compétences et des moyens expérimentaux dont nous avons besoin pour répondre à la demande d'électricité via un procédé respectueux de l'environnement. Les synergies déjà mises en place entre notre offre industrielle et la R&I d'IFPEN, adossées à une volonté commune d'œuvrer à la décarbonation des mix énergétiques, ont un bel avenir devant elles avec un partenariat stratégique à la clé en 2024.



Climat, environnement et économie circulaire

CO₂ : captage, stockage & émissions négatives

Au regard des enjeux de décarbonation à l'échelle mondiale, les technologies de captage, stockage et utilisation du CO₂ sont identifiées par le GIEC et l'AIE comme des leviers de premier plan dans la lutte contre le réchauffement climatique. Si ces technologies sont clairement intégrées dans les feuilles de route sectorielles et nationales, à l'instar de la stratégie publiée en juin 2023 par la France, elles font maintenant l'objet de projets industriels concrets. Les travaux menés par les équipes du Carnot IFPEN RE, destinés à accélérer le déploiement à grande échelle de la filière, couvrent l'ensemble de la chaîne du captage, transport et stockage du CO₂. Ils apportent la démonstration d'une chaîne CCS fiable et sécurisée sur l'ensemble des briques technologiques. En témoigne le succès des premiers tests menés sur le pilote industriel situé sur le site ArcelorMittal de Dunkerque, visant à démontrer les performances du procédé DMX™ de captage du CO₂ issu d'activités industrielles.

En parallèle, les équipes du Carnot évaluent le bénéfice de la mise en œuvre du CCS au travers d'analyses de cycle de vie et la réalisation de scénarios de déploiement à différentes échelles.

Fait marquant

Projet CHEERS : démarrage de l'unité CLC à Deyang, en Chine

En juin 2023, le projet sino-européen CHEERS, qui réunit neuf partenaires industriels, universitaires et institutionnels, est entre dans une phase importante avec le démarrage de l'unité démonstration de grande taille (d'une capacité de 3 MWth) du procédé CLC (Chemical Looping Combustion), mis au point par IFPEN et Total Energies, permettant de valider cette technologie de captage de CO₂ sur unités de production d'énergie à partir de combustibles solides (fossiles, biomasse, déchets) à un coût compétitif et contribuer ainsi à la décarbonation de l'industrie.



Mitigation des impacts du changement climatique sur les systèmes naturels

Le Carnot IFPEN RE développe des technologies de suivi des stocks de carbone des sols et des éco-agro-systèmes, en cohérence avec le plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) qui vise à renforcer la résilience des écosystèmes (sols, forêts, mer et littoral, biodiversité et ressources en eaux) pour leur permettre de s'adapter au changement climatique et aux événements extrêmes. Le carbone est un élément majeur des cycles biogéochimiques et la réalisation de suivi des stocks de carbone des sols et des éco-agro-systèmes fait partie des réponses aux enjeux écologiques. Le Carnot collabore avec des partenaires nationaux (INRAE, IRD, BRGM), notamment au travers de divers projets collaboratifs, ainsi qu'avec des acteurs industriels pour valider ses technologies d'analyse du carbone et contribuer à apporter des solutions pour la transition écologique. En 2023, le Carnot IFPEN RE a ainsi participé au côté du BRGM au démarrage du projet Gesipol (recherche pour la gestion intégrée des sites pollués), subventionné par l'ADEME, qui vise à refunctionaliser les sols, ainsi qu'à un projet plan de relance avec Valorhiz pour étudier le potentiel des sols à faible teneur en carbone.

Par ailleurs, il a poursuivi le développement d'outils de surveillance environnementale de suivi de molécules polluantes (suite Flair) et les a testés en conditions industrielles avec ses partenaires.

Enfin le Carnot IFPEN RE développe des outils et connaissances pour la gestion de la ressource en eau. Ainsi, un nouveau projet a été accepté au sein du PEPR exploratoire OneWater : les équipes IFPEN, en collaboration avec le BRGM et Hydrosience Montpellier, s'intéressent aux aquifères karstiques du sud de la France, et ce alors qu'a démarré, également en 2023, le projet ERC KARST relatif au catalogue et la modélisation des aquifères karstiques en général.



INTERVIEW DE :

Benoît Noetinger,
chef du projet ERC KARST



Le projet KARST, lancé en mai 2023 pour une durée de six ans, est financé par l'octroi d'une bourse ERC (European Research Council) Synergy attribuée par un jury international. Une reconnaissance majeure pour le Carnot et ses partenaires, à la hauteur des enjeux que représentent les aquifères karstiques à l'heure du changement climatique. KARST vise à établir un « catalogue » de systèmes de grottes pour mieux comprendre leur formation, leur structure et le comportement des fluides (eau, air, voire polluants) qui y circulent, notamment sous l'influence d'événements climatiques extrêmes. KARST est une preuve renouvelée de la capacité du Carnot IFPEN Ressources Énergétiques à nouer des liens stratégiques avec des partenaires internationaux (IDAEA- CSIC Espagne, universités de Ljubljana et de Neuchâtel). Je suis heureux de faire partie d'un quatuor de chercheurs confirmés copilotant ce projet et d'associer mes compétences aux leurs, et à celles des équipes IFPEN concernées, constituant ainsi une force de recherche décuplée au service de la transition écologique.



Fait marquant

La Flair box prend un nouvel envol

L'année 2023 marque la consolidation du positionnement de la technologie Flair sur le segment de la surveillance industrielle et environnementale des gaz, avec le déploiement sur le site de stockage de gaz de TERECA dans le sud-ouest de la France de huit Flair Box (sept unités fixes et une unité mobile). Ces stations autonomes, installées sur site ou embarquées dans la Flair Car pour des mesures mobiles, permettent, grâce à leur capteur, d'analyser par spectrométrie UV une large gamme de molécules à de très faibles teneurs. En partenariat avec Tidav, start-up ayant mis au point un drone capable de résister à de fortes rafales de vent, et l'ONERA, le Carnot développe, sous le nom de projet Falkor, une solution aéroportée du monitoring multi-gaz. Les sponsors industriels de ce partenariat, mis en place dans le cadre du programme CITEPH de l'association EVOLEN, sont GRTgaz, TotalEnergies et TERECA.



La naissance de GreenWITS consacre 12 ans de recherche en R&I sur l'éolien

GreenWITS, nouvelle filiale d'IFPEN dédiée à l'éolien, propose des services numériques avancés aux développeurs et exploitants de projets. L'entité n'aurait pas pu voir le jour sans la pertinence des solutions imaginées et développées par les chercheurs du Carnot IFPEN Ressources Énergétiques (RE).



Le groupe IFPEN s'est agrandi avec la création, en mai 2023, d'une filiale consacrée à l'éolien, dénommée GreenWITS. Dedicée à la valorisation des savoir-faire du Carnot IFPEN RE, GreenWITS propose des services numériques avancés aux développeurs et exploitants de projets selon quatre grands axes :

- Optimiser la conception des parcs éoliens, et notamment l'implantation des éoliennes pour limiter les pertes d'énergie par sillage (interactions aérodynamiques entre elles),
- Sécuriser le design des fondations des éoliennes offshore par des calculs avancés,
- Monitorer la performance et la santé des actifs éoliens,
- Augmenter la production des parcs en les pilotant de façon optimale pour réduire l'impact des sillages.

Ces quatre axes présentent des degrés divers de maturité et continueront à bénéficier des apports de la recherche du Carnot. Les équipes du Carnot IFPEN RE et celles de GreenWITS sont complémentaires. GreenWITS, en prise directe avec les industriels, sait répondre à leurs besoins en utilisant une large gamme de logiciels, en particulier ceux développés par le Carnot IFPEN RE. Si pour répondre à ces demandes, il s'avère nécessaire de développer de nouvelles fonctionnalités ou de concevoir de nouveaux outils, IFPEN et Greenwits traitent en synergie les défis techniques et scientifiques associés, en vue de mettre au point la solution optimale pour le client. Ce schéma de fonctionnement est déjà celui qui régit les relations qu'entretient IFPEN avec ses autres filiales comme Axens et Beicip-Franlab.



« La création de GreenWITS est une réelle opportunité pour valoriser notre R&I. Son rôle est clair : elle établit ou facilite le lien entre d'une part nos thématiques de recherche ciblées et les sorties « projet » associées, et d'autre part les applications et marchés industriels pouvant en bénéficier. Le chemin de concrétisation de nos solutions et algorithmes, de la feuille de route jusqu'au produit fini déployé, devient ainsi plus tangible, pour notre R&I comme pour les interlocuteurs « marché ». Du point de vue opérationnel, cela annonce des collaborations concrètes et stimulantes entre les équipes du Carnot IFPEN RE et GreenWITS, » précise Fabrice Guillemin, chef du projet Contrôle des éoliennes à IFPEN.

En savoir plus : www.greenwits.com



Rappel historique

Les travaux de recherche dédiés à l'éolien ont démarré à IFPEN en 2011 et ont d'abord concerné l'éolien flottant (logiciel DeepLines Wind™) et le contrôle d'éolienne assisté par lidar. En 2015, une alliance est conclue avec SBM Offshore, l'un des objectifs étant de développer un système de flotteur destiné au parc pilote de Provence Grand Large, projet soutenu par l'ADEME et opéré par EDF Renouvelables.

En 2017, un partenariat est établi avec la société Vaisala pour intégrer aux lidars « WindCube nacelle TC » qu'elle commercialise la solution d'IFPEN WiSE™-WindField de calcul du champ de vent incident à partir des données brutes du lidar.

En 2018, un nouveau thème de recherche fait son apparition : l'étude des sillages créés en aval des éoliennes, sillages pouvant entraîner des pertes de productivité. Dans ce contexte, IFPEN développe le logiciel de modélisation de ferme FarmShadow™ pour, notamment, évaluer ces pertes.

En 2019, le concept de jumeau numérique est introduit à l'échelle de l'éolienne pour en améliorer l'exploitation, puis il s'étend à l'échelle du parc avec la solution de redirection de sillage WiSE™-Farm.

La recherche du Carnot IFPEN RE sur l'ensemble de la chaîne de valeur

Évaluation et exploitation des ressources

- Analyse du vent par Lidar
- Simulations de sillage
- Algorithmes d'optimisation pour la conception de parcs éoliens

Conception en mer

- Co-développement du logiciel DeepLines Wind™
- Conception de flotteurs

Ingénierie des câbles sous-marins

- Outils d'ingénierie avancés

Contrôle des éoliennes

- Contrôle assisté par Lidar de l'éolienne

Contrôle de parc éolien

- Stratégie de contrôle basée sur la redirection de sillage

Exploitation et maintenance

- Prédiction de la houle en temps réel pour les opérations offshore
- Jumeau numérique pour améliorer la surveillance des éoliennes et des parcs



Des liens forts avec des partenaires clés

... de la recherche

Le Carnot IFPEN RE fait partie de plusieurs réseaux de recherche tels que l'alliance Ancre en France ou le programme de coopération technologique IEA-Wind de l'Agence internationale de l'énergie. Il collabore avec de nombreux organismes de recherche nationaux, européens ou internationaux. Ainsi, des partenariats ont été noués avec le CNRM (Météo-France) et le Laboratoire d'Aérodynamique (CNRS) pour enrichir le code Meso-NH de modélisation météorologique multi-échelle (de quelques mètres à quelques milliers de km), le LHEEA (Centrale Nantes, CNRS) pour étudier la turbulence induite par une éolienne et les centres de recherche danois DTU (Université Technique du Danemark) ou américain NREL (National Renewable Energy Laboratory) pour modéliser les éoliennes offshore ou les sillages. On notera notamment le projet européen H2020 HIPERWIND coordonné par le DTU et dans lequel le Carnot joue un rôle majeur pour réduire les incertitudes lors la conception des éoliennes afin d'en réduire significativement les coûts. Enfin, pour faire naître de nouvelles synergies, le Carnot IFPEN RE collabore avec France Renouvelables avec qui sont co-organisées les Journées Scientifiques de l'Éolien.

... et de l'industrie

Afin de répondre au mieux aux problématiques industrielles, le Carnot IFPEN RE a noué des relations fortes avec des acteurs importants de l'éolien. Cela se traduit par des collaborations par exemple avec SBM Offshore sur le design de supports flottants mis en œuvre notamment à l'occasion du projet de Provence Grand Large réalisé pour EDF Renouvelables, Vaisala sur les outils de prédiction du vent par lidar ou encore Principia sur le logiciel DeepLines Wind™.



ACTIONS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET DE PROFESSIONNALISATION

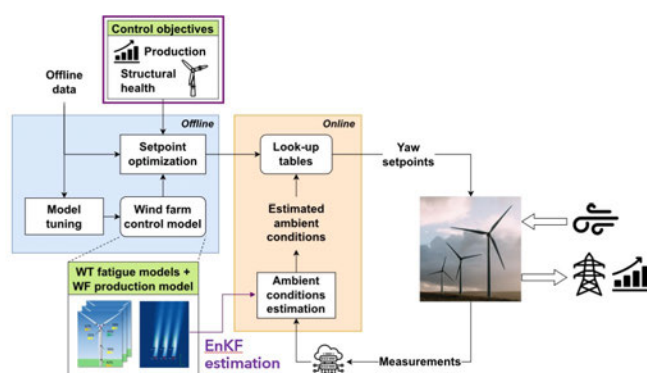
L'abondement Carnot offre au Carnot IPFEN Ressources Énergétiques l'opportunité d'accélérer le développement de ses compétences et de renforcer ses démarches en faveur de l'innovation.

ÉOLIEN ET ENERGIES MARINES

Calibration en ligne d'un jumeau numérique pour le contrôle des fermes éoliennes

Dans le cadre du développement de stratégies innovantes pour un pilotage optimal des fermes éoliennes, plusieurs actions ont été réalisées au sein du Carnot IPFEN RE :

- Conception et consolidation de l'architecture IPFEN pour la stratégie de contrôle de ferme par redirection de sillage : cette étape a posé les bases de l'architecture permettant de gérer efficacement les interactions entre éoliennes.
- Premières implémentations de la fonctionnalité « jumeau numérique de parc » : cette fonctionnalité permet à la fois d'identifier et de compenser les biais et dérives des mesures disponibles sur les éoliennes, ainsi que de calibrer en ligne les modèles de sillage embarqués. Cette brique est essentielle pour garantir la fiabilité de la stratégie de contrôle.
- Évolutions de la stratégie de contrôle par redirection de sillage : des améliorations ont été intégrées pour équilibrer la production des actifs et les sollicitations structurelles subies, telles que la fatigue des tours et des pales.



- Estimation et réduction des incertitudes de mesure et de modélisation : des pistes ont été étudiées pour renforcer la robustesse des algorithmes face aux incertitudes, en tenant compte des limitations des actionneurs, afin d'aboutir à une faisabilité industrielle quantifiée.

Ces technologies permettront aux gestionnaires de parcs éoliens d'optimiser l'opération en maximisant la production d'électricité tout en contrôlant la durée de vie des machines.

Solution de contrôle de parc éolien en boucle ouverte utilisant un jumeau numérique de ferme pour évaluer la production électrique en temps réel.

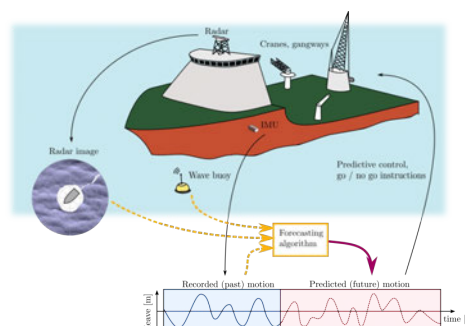
Prédiction et mesure de houle à partir de capteurs distants

Les mesures des vagues, qu'elles soient analysées statistiquement via leur spectre ou de manière détaillée « vague par vague », ont des applications cruciales pour l'éolien offshore, notamment dans les domaines du monitoring et de la sécurité des opérations en mer pour la construction et la maintenance. Pour cela, les équipes du Carnot IPFEN RE utilisent des instruments capables de voir à distance, tels que les radars maritimes à bande X, les caméras stéréoscopiques et les lidars. Toutefois, de nombreux défis scientifiques et technologiques restent à surmonter pour que ces instruments puissent être utilisés comme véritables capteurs de houle.

Les actions suivantes ont ainsi été menées en 2023 :

- Enrichissement de notre base de données : mesures réalisées par caméras stéréoscopiques et radars maritimes.
- Évaluation des algorithmes de prédiction : tests effectués sur de nouveaux jeux de données.
- Étude de la prévisibilité des vagues : analyse basée sur les différents capteurs disponibles.
- Inversion d'images radar : obtention du champ de vagues sous-jacent à partir des images radar.

Ces travaux ont permis de présenter quatre communications lors de divers événements : le *Waves, Storm Surges and Coastal Hazard Workshop*, le forum *Seenergy*, la journée scientifique *GdR Eol-EMR* et le *Aran Islands International Research Station Workshop*. Une recherche active de partenariat est en cours pour évaluer la technologie en conditions réelles d'opération.



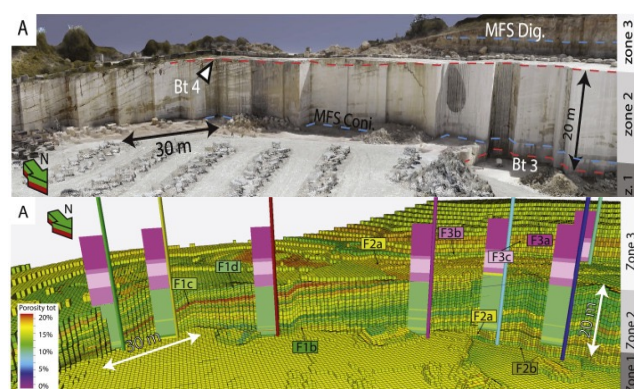
Prédiction de houle à partir des mesures d'un radar embarqué sur le bateau d'intervention.

RESSOURCES ET USAGES DU SOUS-SOL POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Étude de l'hétérogénéité des structures et aquifères carbonatés complexes (calcaires de l'Oolithe Blanche)

En 2023, une mission de terrain a été réalisée dans la carrière de Massangis en Bourgogne, permettant de récupérer cinq blocs de roches représentatifs des faciès de clinoforèmes de l'Oolithe Blanche, un aquifère jurassique du Bassin de Paris, cible principale pour l'exploitation de l'énergie géothermique. Ces faciès, d'environ 20 m d'épaisseur, sont exposés par les fronts de taille de la carrière. Généralement fortement cimentés, les plans des clinoforèmes fonctionnent comme des drains pour l'eau, créant des zones humides.

Les blocs prélevés ont été analysés dans les laboratoires de pétroacoustique, pétrophysique et pétrographie, en utilisant une approche de sous-échantillonnage multidimensionnel. Les analyses ont inclus des techniques telles que le scanner X-CT, la RMN, la mesure de la porosité, de la perméabilité, de la pétroacoustique (vP et vS) et de la pétrographie.



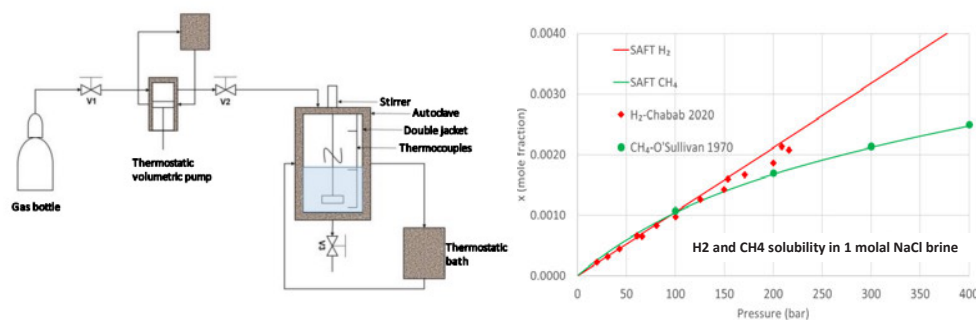
Bien que la porosité totale des échantillons dépasse les 10 %, la microporosité dominante explique leur très faible perméabilité. Cette conclusion ouvre de nouvelles perspectives de recherche et de développement de compétences pour une meilleure quantification des ressources géothermales.

Habillage en porosité à partir des observations de la carrière.

Études sur la thermodynamique des mélanges hydrogène et interactions biologiques avec le sous-sol

En 2023, le Carnot IPFEN RE a entrepris une première étude sur la thermodynamique des mélanges H_2 avec des impuretés (CH_4 et CO_2) et de la saumure dans le cadre du projet H2Stock, en partenariat avec le Carnot IsiFor. L'objectif était de mieux décrire les équilibres de phase de ce mélange afin de quantifier la solubilité des gaz. Deux équations d'état ont été évaluées : une approche plutôt empirique (S&W) et une autre plus théorique (ePC-SAFT). Les deux modèles ont fourni des prédictions très acceptables comparées aux données existantes. Ces modèles ont ensuite été utilisés pour extrapoler à d'autres conditions de mélange et guider les expérimentations réalisées par le partenaire du projet.

Les équipes ont mené une deuxième étude visant à quantifier les interactions biologiques entre l' H_2 et le sous-sol. La cinétique de consommation d' H_2 a été caractérisée pour deux souches bactériennes, l'une méthanogène et l'autre sulfato-réductrice. Pour la souche méthanogène, la consommation d' H_2 est totale, indépendamment de la concentration en sulfate. Pour la souche sulfato-réductrice, il faut entre 4 et 5 g/l de sulfates pour que cette bactérie consomme l'intégralité de l' H_2 initialement présent. Les données cinétiques ont été modélisées en utilisant une base Monod-Dual modifiée par Panfilov. Ce modèle a d'abord été validé avec des données de la littérature avant d'être appliqué aux données acquises dans ce projet.



Thermodynamique des mélanges d'hydrogène : des prédictions des propriétés améliorées (montage expérimental et comparaison entre données et modèle théoriques).

STOCKAGE ET GESTION DE L'ÉNERGIE

Développement et validation de simulations numériques pour le stockage d'énergie adiabatique avancé

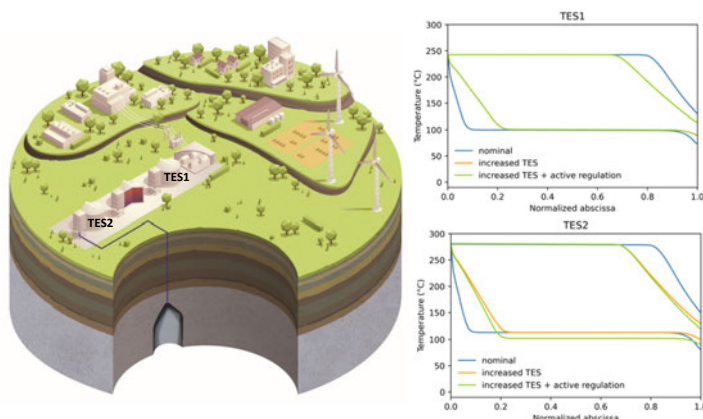
Dans le cadre de ses travaux sur une technologie de stockage d'énergie de type Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES), le Carnot IFPEN RE a initié le développement de deux outils de recherche : CAESAR pour la simulation dynamique du procédé et THEMIS pour la simulation du composant de stockage d'énergie thermique (TES).

En 2023, deux actions ont été menées pour valider et améliorer les simulations numériques :

1. Étude de la diffusion thermique dans le système TES - Dans le système AA-CAES, la chaleur est stockée dans un système thermocline composé de graviers. La diffusion thermique pendant les phases d'attente peut affecter le rendement global du système, rendant une modélisation réaliste indispensable. Le système étant diphasique avec une géométrie complexe et non-homogène, des essais ont été réalisés sur le moyen expérimental IFPEN pour étudier la propagation du front thermique. Ces essais ont été utilisés pour valider les outils numériques.
2. Améliorations de l'outil CAESAR - L'outil a été perfectionné, notamment par le développement d'une modélisation plus réaliste de la cavité, permettant de prendre en compte la variation de la température en fonction du remplissage et de la vidange de cette dernière.

Une publication des travaux a été soumise au premier trimestre 2024. Ces outils numériques vont permettre d'optimiser le design des TES et ainsi aider à démontrer la pertinence des solutions technologiques de type AA-CAES.

Calcul de la répartition de température dans un TES (graphique de droite) pour différentes configurations d'utilisation d'un stockage AA-CAES (schéma de gauche).

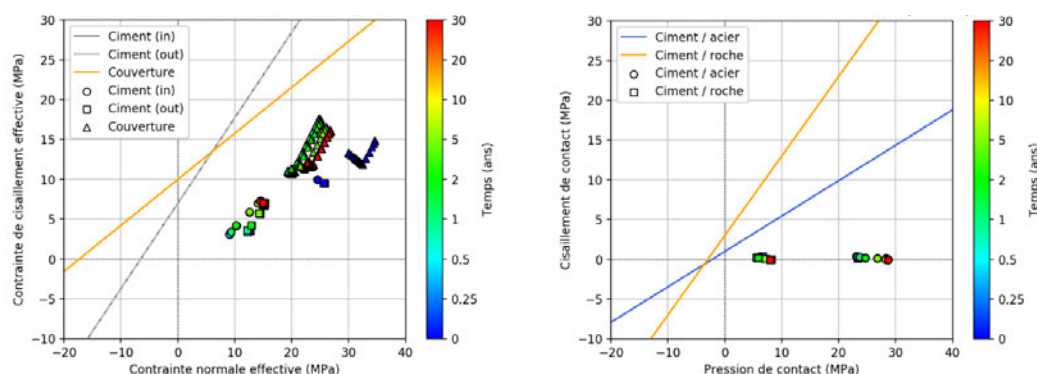


CO₂ : CAPTAGE, STOCKAGE & ÉMISSIONS NÉGATIVES

CCUS, modèle numérique du puits

La fiabilité du stockage de CO₂ sur une longue durée constitue un enjeu primordial. Cette solution doit démontrer qu'elle représente un moyen efficace de lutte contre le changement climatique et assurer la rétention fiable, sécurisée et à très long terme du CO₂. De plus, cette solution ne doit en aucun cas causer un dommage quelconque à l'environnement local. Seuls les sites et les puits présentant toutes les garanties de sécurité doivent être choisis pour le stockage du CO₂. La première étape consiste à modéliser les sites et les puits identifiés pour le stockage du CO₂.

Dans ce cadre, le Carnot IFPEN RE a conçu un outil de modélisation permettant d'évaluer les risques d'intégrité de l'état du puits à tout moment de l'exploitation, notamment durant la phase d'injection du CO₂. Durant le développement de l'outil, les équipes ont veillé à ce qu'il soit suffisamment simple et rapide. En outre, elles l'ont testé sur plusieurs cas issus de la littérature pour représenter correctement la physique du puits. À l'avenir, cette première version de l'outil de modélisation doit être combinée avec des techniques de gestion et de monitoring, ce qui permettra la détection de toute remontée éventuelle de CO₂.



Position des contraintes calculées par rapport aux surfaces de rupture, sur 30 ans.

À gauche : contraintes dans les matériaux (critère de Mohr Coulomb), à droite : contraintes aux interfaces (frottement de Coulomb).

MITIGATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES SYSTÈMES NATURELS

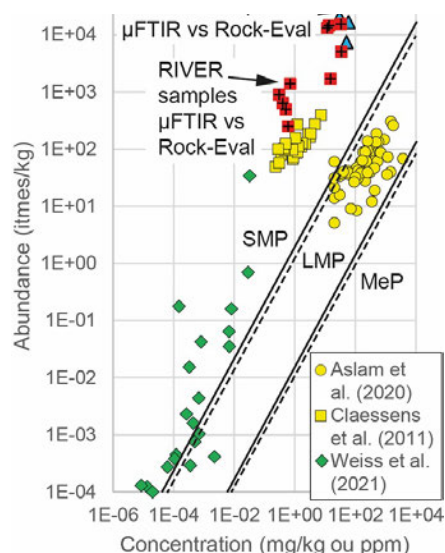
Optimisation des procédures d'échantillonnages, de préparation et d'analyse pour la détection et la quantification massive des microplastiques dans l'environnement

L'action visait à travailler en 2023 sur deux axes en parallèle :

- *Large microplastics (LMPs)* : utilisation de méthodes d'analyse d'image avec des approches d'intelligence artificielle.
- *Small microplastics (SMPs)* : utilisation de la méthode Rock-Eval® (Romero-Sarmiento et al., 2022).

Le travail réalisé par le Carnot IFPEN RE a porté sur sept cas d'étude naturels afin de diversifier les problématiques d'application des méthodes de quantification massive (ppm ou mg/kg) des microplastiques dans l'environnement. Les résultats obtenus ont été confrontés aux analyses des laboratoires partenaires (CEDRE, Université de Nantes, LABOCEA-CEREMA). Les analyses des SMP avec le Rock-Eval® ont fourni des estimations massiques cohérentes et comparables aux méthodes de référence telles que le Py-GCMS et le μ FTIR. Les analyses des LMP ont complété les quantifications réalisées sur les réseaux de surveillance du littoral français.

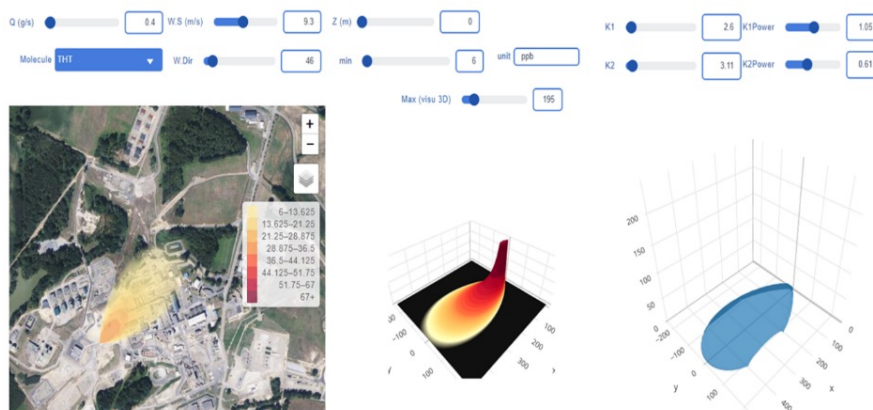
Ces résultats ont été présentés dans trois congrès en 2023 et feront l'objet de présentations supplémentaires en 2024 avec les laboratoires partenaires. Ces travaux permettent une première évaluation des méthodes thermiques basées sur le Rock-Eval comme technique alternative pour quantifier la pollution par les microplastiques dans l'environnement.



Comparaison de l'abondance (nb/kg) en fonction de la concentration (mg/kg) des microplastiques dans l'environnement. Une sélection des résultats du projet (carrés rouges et triangles bleus) sont confrontés aux données de la littérature. Les estimations massiques en utilisant les résultats des analyses Rock-Eval® s'alignent en cohérence avec les quantifications au μ FTIR.

Flair Suite™, modélisation du panache de pollution

Des modèles gaussiens ont été développés pour localiser rapidement le point de fuite et estimer la dispersion du panache de pollution. La méthodologie utilisée est la suivante : les stations mesurent en temps réel les concentrations de gaz dans l'air ambiant et les données de vent, puis géo-référencent ces informations. Un algorithme analyse ces signaux pour déterminer le point de fuite du polluant. Pour les équipes du Carnot IFPEN RE, le défi consistait à créer un algorithme robuste et s'exécutant en temps réel avec une marge d'erreur réduite. La pertinence des résultats fournis par l'algorithme a été testée à l'aide de données obtenues lors d'un test à l'aveugle. Ces résultats ont permis de déposer un brevet et feront l'objet d'un article scientifique. Pour la dispersion du polluant, deux types de modèles ont été développés : un modèle rapide basé sur la méthode gaussienne et un modèle plus précis utilisant la dynamique des fluides numériques (CFD). Parallèlement, la web-application Flair Map a été améliorée pour intégrer ces calculs et afficher les panaches sur le tableau de bord des stations.



UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

Dans le cadre de leurs travaux de recherche, les équipes du Carnot IFPEN RE sont engagées dans plusieurs projets nationaux et européens avec de nombreux acteurs académiques et industriels. Elles contribuent ainsi au développement de la R&I européenne pour des systèmes énergétiques durables. Panorama des projets dans lesquels le Carnot IFPEN RE était engagé.

ÉOLIEN ET ÉNERGIES MARINES		
NOUVEAU IDEA	Conception intégrée de fermes d'éoliennes flottantes	ADEME
MOMENTA	<i>FarM rOtor ModEl accouNting aTmospheric wAke turbulence</i> (modèle de rotor de ferme prenant en compte les turbulences atmosphériques)	ANR
NOUVEAU LCA-TASE (PEPR TASE)	<i>Life Cycle Assessment based metrics for industry and research to support industrial processes decarbonization while minimizing environmental impacts</i> (indicateurs basés sur l'évaluation du cycle de vie pour l'industrie et la recherche afin de soutenir la décarbonisation des processus industriels tout en minimisant les impacts environnementaux)	
Hiperwind	<i>Highly advanced Probabilistic design and Enhanced Reliability methods for high-value, cost-efficient offshore WIND</i> (Conception probabiliste hautement avancée et méthodes de fiabilité améliorée pour des éoliennes offshore rentables)	Commission européenne
RESSOURCES ET USAGES DU SOUS-SOL POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE		
DEEPEN	<i>DErinking Exploration for geothermal Plays in magmatic ENvironments</i> (Exploration à risque des gisements géothermiques dans les environnements magmatiques)	ADEME
SISMOSUB	Une approche sismique et diagraphique d'optimisation de trajectoires et de productivités de drains subhorizontaux	
UPGEO	<i>UPscaling and heat simulations for improving the efficiency of deep GEOthermal energy</i> (Simulations d'augmentation d'échelle et de chaleur pour améliorer l'efficacité de l'énergie géothermique profonde)	ANR
BIOCIDES	Nouvelle stratégie de remédiation du biocolmatage en milieu poreux : application à la géothermie	
GLITER	Investigation intégrée et multi échelle des sources et chemins de circulation de la chaleur et du lithium dans un système géothermal profond : focus sur le fossé rhénan	
ORHYON	Micro-organismes et réactivité de l'hydrogène dans le sous-sol	
H2 Hyperstock (PEPR - H2 Décarboné)	Stockage hyperbare de l'hydrogène Référentiel et méthodologies matériaux	
HYSTOREN	<i>Hydrogen storage in an underground hydrosystem: physicochemical behaviour, monitoring and environmental impact</i> (Stockage d'hydrogène dans un hydrosystème souterrain : comportement physico-chimique, surveillance et impact environnemental)	Commission européenne
HOCLOOP	<i>A circular by design environmentally friendly geothermal energy solution based on a horizontal closed loop</i> (Solution d'énergie géothermique respectueuse de l'environnement, conçue selon les principes de l'économie circulaire et basée sur une boucle fermée horizontale)	
SHARE-TWIN	La plateforme open-source de partage de jumeaux numériques pour la géologie urbaine	Région

STOCKAGE ET GESTION DE L'ÉNERGIE		
TRANZAE	Cartographie des 20 000 Zones d'activités économiques (ZAE) du territoire national afin de favoriser l'émergence de communautés locale d'énergie	ADEME
CO ₂ : CAPTAGE, STOCKAGE & ÉMISSIONS NÉGATIVES		
Aquifer CO2 Leak	Développement et mise en œuvre de méthodologies de localisation d'une fuite de CO ₂ et gaz associés par approche multi-puits, multi-traceurs : impacts sur l'hydrosystème en contexte de stockage	ADEME
Pilot Strategy	CO ₂ geological pilots in strategic territories (Projets pilotes de stockage géologique de CO ₂ dans des territoires stratégique)	Commission européenne
SUN2CHEM	Novel photo-assisted systems for direct Solar-driven redUctioN of CO ₂ to energy rich CHEMicals (Nouveaux systèmes photo-assistés pour la réduction directe du CO ₂ par énergie solaire en produits chimiques riches en énergie)	
MITIGATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES SYSTÈMES NATURELS		
PLASTISOL	Définition d'indicateurs de la présence de matières plastiques (MP) dans les sols	ADEME
NOUVEAU RESPONSE	Refonctionnalisation écologique des sols potentiellement pollués en faveur de la nature des services écosystémiques	
NOUVEAU TEPMA	Transition Énergétique et Pollution chimique des Milieux Aquatiques	
VULCAR FATE	Impact of global climate change on vulnerable carbon pools (Impact du changement climatique sur les réservoirs de carbone vulnérables)	ANR
NOUVEAU ALAMOD (PEPR FairCarboN)	Vers des modèles de dynamique du carbone dans les écosystèmes partagés, validés sur un outil de benchmark incontournable	
e-DIP	Dynamique environnementale et impacts des cocktails de contaminants provenant des plastiques dans les écosystèmes terrestres	
NOUVEAU HILANDER	Eau cachée et érosion du paysage	
NOUVEAU K3 (PEPR ONEWATER)	Impact des changements globaux sur la ressource en eau des socio-hydrosystèmes karstiques : vulnérabilité, sensibilité et gestion	
NOUVEAU OPTISOIL	Des solutions fondées sur la nature pour optimiser les fonctions des sols dans les villes du futur	
SIC soc DYN	Organic and inorganic carbon dynamics in calcareous soils (Dynamiques du carbone organique et inorganique dans les sols calcaires)	Commission européenne
KARST	KARST: Predicting flow and transport in complex Karst systems (Prédiction de l'écoulement et du transport dans des systèmes karstiques complexe)	

SALONS ET MANIFESTATIONS 2023

5-8 juin 2023 - Vienne

EAGE



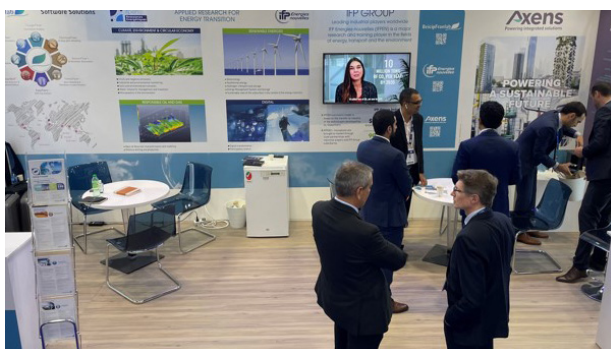
20-21 juin 2023 - Paris

Seenergy



2-5 octobre 2023 - Abu Dhabi

ADIPEC



18-19 octobre - Lyon

RDV Carnot



8 décembre - Paris

Rencontres EcoTech Énergie



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

Rendez-vous sur le site
www.carnot-ifpen-re.fr

NOS ÉTABLISSEMENTS

RUEIL-MALMAISON

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

LYON

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

Contact : Benjamin Herzhaft

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

Maquette : IFPEN

Mise en page : ExeAtelierTypao

Photos : © Adobe Stock, IFPEN, X. - 0624



RAPPORT D'ACTIVITÉ

2023