



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



ifpen

Ressources
Énergétiques

CARNOT IFPEN RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES

2025

INNOVER POUR
DES RESSOURCES
DÉCARBONÉES
ET DURABLES



SOMMAIRE

4	CARNOT RESSOURCES ÉNÉRGÉTIQUES EN BREF UN ACTEUR DE LA TRANSITION ÉNÉRGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE
6	FAITS MARQUANTS
10	GRAND ANGLE LE TRAITEMENT DE L'EAU FACE AUX POLLUANTS ÉMERGENTS
12	ACTIONS RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET PROFESSIONNALISATION 12. Stockage et gestion de l'énergie 15. Ressources et usages du sous-sol 18. Interactions climat/sol et cycle de l'eau 21. Solutions numériques pour le sous-sol 22. Éolien
23	UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

ANTICIPER LES TRANSFORMATIONS À VENIR



En 2025, les équipes du Carnot IFPEN Ressources Énergétiques (RE) ont poursuivi avec détermination le développement et le déploiement de solutions innovantes, répondant aux défis majeurs de la transition énergétique et écologique.

L'année a été marquée par des avancées significatives, notamment la mise sur le marché des premières technologies, et le développement d'innovations en collaboration avec nos partenaires industriels, soutenues par une politique active de dépôt de brevets.

Nos travaux sur le traitement de l'eau illustrent notre capacité à adapter nos technologies à des secteurs émergents, et à les transformer en solutions industrielles. Cette dynamique s'est concrétisée par le succès du démonstrateur industriel de la technologie CleanWash™, plusieurs partenariats en cours sur le traitement de l'eau, et le dépôt de brevets concernant le captage des PFAS. Vous trouverez dans ce rapport un « Grand angle » dédié à ces technologies.

Nous sommes également très fiers de la valorisation de notre R&I dans l'éolien, au travers de notre filiale GreenWITS, dont les premiers produits ont pris leur essor et enrichi le catalogue de solutions proposées par le Carnot IFPEN RE.



**Olga Vizika-Kavvadias,
directrice du Carnot IFPEN
Ressources Énergétiques**

Dans le domaine de la gestion de l'énergie, nous avons franchi une étape clé avec le lancement, en septembre 2025, de la solution EMS intitulée NOE, développée en partenariat avec Soalis.

Cette année, l'offre Flair Suite s'est diversifiée, permettant au Carnot IFPEN RE de se positionner sur la caractérisation des fuites de gaz. Parallèlement, nous avons poursuivi nos travaux de recherche sur des thématiques cruciales telles que l'intégrité des puits et l'utilisation du sous-sol pour le stockage de CO₂, l'exploitation de l'hydrogène naturel, ou encore le stockage d'énergie thermique.

Ce rapport annuel met en lumière nos initiatives les plus emblématiques, et reflète notre engagement constants à relever les défis de la transition écologique et énergétique.

Bonne lecture !

CARNOT IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES

Le Carnot IFPEN RE contribue à relever les défis suivants.

DÉFI 1

DÉVELOPPER LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

- Optimiser la production dans l'éolien et la géothermie
- Transporter et stocker l'hydrogène
- Explorer le potentiel de l'hydrogène naturel
- Intégrer les renouvelables dans le réseau d'électricité via le stockage et les systèmes de management de l'énergie (EMS)

DÉFI 2

MINIMISER L'IMPACT CLIMATIQUE DES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES

- Valoriser le captage, le stockage et l'utilisation du CO₂ (CCUS)
- 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

DÉFI 3

SAISIR LES OPPORTUNITÉS OFFERTES PAR LE DIGITAL

- Développer de nouveaux produits, services ou business models via l'accompagnement des industriels dans leur transformation digitale

QUI SOMMES-NOUS ?

IFPEN est l'Institut national de recherche et innovation et de formation en énergie, mobilité et environnement. Ses équipes innovent pour un monde décarboné et durable depuis les concepts scientifiques jusqu'aux solutions technologiques. Procédés, équipements, catalyseurs et adsorbants, logiciels, ou services : ses innovations bas-carbone posent les jalons de la transition et facilitent l'émergence de filières industrielles d'avenir.

Le Carnot IFPEN RE intègre 12 laboratoires d'IFPEN au service de la transition énergétique et écologique. 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 avancées du digital.



12



LABORATOIRES DE RECHERCHE

représentant

451

ETP DONT

67 DOCTORANTS

ET POST-DOCTORANTS



74

CONTRATS DE RECHERCHE CONTRACTUELLE

avec 32 industriels, dont :

- 40 % à l'international
- 60 % avec des acteurs socio-économiques français, impliquant 19 entreprises nationales, dont 11 ETI/PME/TPE

11 CONTRATS
de licences
d'exploitation avec
8 ENTREPRISES

BREVETS

38

BREVETS DÉPOSÉS
DANS L'ANNÉE



et

1 351

DÉTENUS DANS LE PORTEFEUILLE
DE BREVETS

25



PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIVE

auxquels contribuent

46 ENTREPRISES PARTENAIRES

67

PUBLICATIONS
DE RANG A



FAITS MARQUANTS

JANVIER

UNE EXPERTISE RECONNUE POUR
RÉPONDRE AUX DÉFIS DE LA GESTION
DURABLE DE L'EAU



Les travaux du Carnot IFPEN RE ont fait l'objet de la publication d'un focus consacré à la gestion durable de l'eau. Celui-ci valorise les recherches conduites sur le traitement des polluants industriels et émergents, notamment les PFAS et les microplastiques, ainsi que les solutions développées pour optimiser l'usage de l'eau dans les procédés industriels.

FÉVRIER

SOLS, CARBONE ET BIODIVERSITÉ :
DES PROJETS STRUCTURANTS AU SERVICE
DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

L'année a été marquée par l'avancement des projets majeurs MICE, RESPONSE et OPTISOIL,

mobilisant les expertises du Carnot dans les domaines de la géochimie organique, de l'analyse des sols et du suivi des cycles biogéochimiques. Ces travaux visent à mieux comprendre les mécanismes de stockage du carbone, à restaurer les fonctions écologiques des sols dégradés, et à développer des solutions fondées sur la nature pour renforcer la résilience des territoires urbains et périurbains.

MARS

POLLISIDER : ACCOMPAGNER LA
RÉHABILITATION DES VALLÉES SIDÉRURGiques

Coordinateur du projet ANR PollSider, le Carnot IFPEN RE poursuit le développement d'outils d'aide à la décision destinés aux gestionnaires de cours d'eau confrontés à l'héritage environnemental des anciennes activités sidérurgiques. Les recherches visent à mieux caractériser les pollutions organiques présentes dans les sédiments et dépôts historiques, à évaluer leur évolution dans le temps, et à anticiper les risques associés.



AVRIL

UNE INNOVATION NUMÉRIQUE POUR LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES ENTREPRISES



Le partenariat conclu avec la société Soalis marque une nouvelle étape dans la valorisation des technologies développées au sein du Carnot. Au cœur de cette collaboration figure NOE, une solution associant production photovoltaïque, stockage par batterie et pilotage intelligent de l'énergie. Les premiers déploiements sont engagés auprès d'un panel de clients pilotes.

DE PREMIERS RÉSULTATS ENCOURAGEANTS POUR L'EXPLORATION DE L'HYDROGÈNE NATUREL

Les premiers enseignements du projet inter-Carnot ExploH2 ont été présentés au printemps. Ce programme de recherche vise à mieux comprendre les mécanismes de génération de l'hydrogène naturel, et à évaluer le potentiel de certaines formations géologiques. Les travaux conduits conjointement avec les partenaires académiques ont permis d'identifier des zones présentant un potentiel de production prometteur.



JUIN

UN PROJET EUROPÉEN POUR PRÉPARER LE DÉPLOIEMENT INDUSTRIEL DE L'ÉNERGIE HOULOMOTRICE

Sélectionné dans le cadre du programme Horizon Europe, le projet COIN réunit neuf partenaires européens autour du développement des futures fermes houlomotrices. Les équipes du Carnot apporteront leur expertise dans le domaine de la prévision des états de mer, avec des technologies également exploitables pour sécuriser les opérations de maintenance de l'éolien offshore.

UNE EXPERTISE RECONNUE DANS LA GÉOTHERMIE ET LA VALORISATION DURABLE DU SOUS-SOL



À l'occasion des Journées de la géothermie organisées à Biarritz, plusieurs chercheurs et experts du Carnot ont présenté leurs travaux sur l'évaluation du potentiel géothermique, la modélisation des réservoirs profonds, et la valorisation des ressources associées, notamment le lithium contenu dans certaines saumures géothermales.

JUILLET

UN RAPPORT STRATÉGIQUE POUR ÉCLAIRER
LES PERSPECTIVES DE L'HYDROGÈNE NATUREL
EN FRANCE



À la demande de la direction générale de l'Énergie et du Climat, le Carnot IFPEN RE a coordonné la réalisation d'un rapport de référence consacré aux potentialités de l'hydrogène naturel sur le territoire français. Mobilisant une quinzaine d'experts, cette étude dresse un état des connaissances scientifiques, des techniques d'exploration, du cadre réglementaire et des enjeux environnementaux associés.

SEPTEMBRE



UNE ALLIANCE STRATÉGIQUE
AVEC VALORHIZ POUR MIEUX
MESURER LE CARBONE
DES SOLS

Le Carnot IFPEN RE et Valorhiz ont officialisé la création du Sustainable Soil Carbon Lab. Ce laboratoire commun a pour ambition de développer de nouvelles méthodes d'analyse des sols, notamment dans les contextes de faible teneur en carbone, afin d'accompagner les démarches de renaturation, de séquestration du carbone et de restauration des terres dégradées. Ce partenariat répond à des enjeux croissants liés au changement climatique, à la préservation des sols et à la sécurité alimentaire.

SENSIBILISER LE GRAND PUBLIC AUX ENJEUX
DE L'HYDROGÈNE NATUREL

Les experts du Carnot ont participé à l'émission « Science en questions » diffusée par L'Esprit Sorcier TV afin de présenter l'état des connaissances sur l'hydrogène naturel et ses perspectives de développement. Cette intervention contribue à faire connaître auprès d'un large public les enjeux scientifiques, énergétiques et industriels associés à cette ressource émergente, ainsi que les travaux conduits par les équipes d'IFPEN sur le sujet.

OCTOBRE

LES RENDEZ-VOUS CARNOT, VITRINE D'UNE OFFRE
D'INNOVATION AU SERVICE DES INDUSTRIELS

À l'occasion des Rendez-vous Carnot organisés à Lyon, le Carnot IFPEN RE a présenté l'étendue de ses compétences dans les domaines du captage et du stockage du CO₂, de la géothermie, de l'éolien, du traitement de l'eau, du monitoring environnemental, du stockage de l'énergie et des solutions numériques pour le sous-sol. Cet événement a permis de renforcer les échanges avec les entreprises, et de mettre en lumière la complémentarité des expertises réunies au sein du réseau des Carnot pour la transition énergétique (RECATÉ).

NOVEMBRE

LA GÉOTHERMIE AU CŒUR DES ÉCHANGES ENTRE INDUSTRIELS, CHERCHEURS ET ACTEURS PUBLICS

En accueillant sur son site de Rueil la 8^e édition des « Petits déj' de la géothermie », le Carnot IFPEN RE a réuni une soixantaine d'acteurs de la filière autour des enjeux liés aux réservoirs géothermiques, à leur modélisation et à la pérennité des installations. Cette rencontre a également permis de valoriser les moyens expérimentaux et les compétences des équipes de recherche mobilisées au service du développement de la géothermie en France et à l'international.

DÉCEMBRE

CLEANWASH™ : PILOTE FINALISÉ ET PREMIERS RÉSULTATS CONCLUANTS



Après cinq ans de développement, le démonstrateur de la technologie CleanWash™ est finalisé. Testée avec succès, cette solution permet de capter à ce jour plus de 90 % des microfibres plastiques directement en sortie des installations de lavage textile professionnel.

UNE CONTRIBUTION TECHNOLOGIQUE MAJEURE AU PREMIER PARC ÉOLIEN FLOTTANT FRANÇAIS

L'inauguration du parc Provence Grand Large constitue une étape importante pour l'éolien flottant en France. Le Carnot IFPEN RE a participé au développement de la technologie de flotteurs mise en œuvre sur ce projet, dérivée du savoir-faire acquis dans l'offshore pétrolier. Les premiers retours d'exploitation confirment les performances attendues en matière de stabilité des éoliennes, et ouvrent la voie à de futurs développements pour les parcs situés en grande profondeur.



LE TRAITEMENT DE L'EAU FACE AUX POLLUANTS ÉMERGENTS

Face aux nouveaux polluants, la pression sur la ressource en eau a pris une nouvelle forme, celle d'une tension qualitative, liée à une complexification des milieux à traiter. Le Carnot IFPEN RE co-développe des technologies innovantes pour répondre aux défis sociétaux de cette pollution.

LA TRANSPOSITION DE TECHNOLOGIES À DES SECTEURS ÉMERGENTS

En collaboration avec des industriels, PME et start-up, le Carnot IFPEN RE s'appuie sur son savoir-faire historique pour traiter les eaux industrielles, usées ou de ruissellement contenant des microplastiques, microfibres textiles et PFAS.

Les travaux d'IFPEN sur la flottation avancée ont abouti à une solution de séparation des particules fines, dont les microplastiques. Ce procédé facilite leur captage, avec l'avantage d'avoir des coûts de maintenance réduits, et se combine à d'autres procédés selon la qualité de l'eau. Des produits de traitement d'eau biosourcés sont également en cours de développement afin d'offrir des solutions intégrées écoresponsables

S'agissant des PFAS, leur persistance due à leur stabilité chimique exceptionnelle nécessite des solutions spécifiques, telles que des solutions de captage par fractionnement par mousse ou adsorbants solides, et des solutions de destruction à développer grâce à de nouveaux partenariats.

Le Carnot IFPEN RE propose également une solution basée sur le dispositif Rock-Eval®, permettant d'identifier et de quantifier rapidement les microplastiques présents dans l'eau, les sédiments ou le sol, via une méthode de dégradation thermique.

Des partenariats sont en cours avec des acteurs industriels et académiques, comme sur le traitement des eaux usées avec le SIAAP (service public de l'assainissement francilien) dans le cadre du programme MOCOPEE, sur la quantification des microplastiques dans les eaux et boues de STEP avec la SAUR (stations d'épuration), de même que dans les eaux de surface et aquifères avec GTK - University of Eastern Finland ou le Carnot Eau & Environnement (pilote par l'INRAE).

POUR ALLER PLUS LOIN

Rendez-vous sur le site
ifpenergiesnouvelles.fr :

- [Notre page](#) sur la gestion durable de l'eau
- [L'émission](#) de L'Esprit Sorcier TV « Plastique : les défis du recyclage »





VERS UNE RÉALITÉ INDUSTRIELLE ?

Présent sur toute la chaîne de valeur, le Carnot IFPEN RE s'appuie sur une R&I multi-échelle allant de l'expérimentation en laboratoire au pilote semi-industriel, tout en analysant le cycle de vie et l'empreinte environnementale. L'outil Rock-Eval® a vocation à mesurer de façon de plus en plus fine la quantité de plastique présente dans l'environnement ou en contexte industriel, pour s'imposer comme un véritable baromètre

de la pollution plastique. L'ambition du Carnot IFPEN RE est de mettre en place une méthode standardisée de référence, en appui aux politiques de traitement et aux stratégies de surveillance.

Dans un contexte d'intérêt grandissant quant à l'industrialisation de ces technologies sur le marché, IFPEN participe activement à des groupes de travail pour faire évoluer les réglementations.

LA MONTÉE EN ÉCHELLE EN RÉPONSE AUX ENJEUX INDUSTRIELS

Le Carnot IFPEN RE mobilise son expertise et ses capacités d'essais pour tester, qualifier et déployer à grande échelle des technologies innovantes en collaboration avec différents acteurs.

La technologie CleanWash™ permet de capter à la source les microfibres plastique issues des eaux de lavage textile professionnel. Cette innovation repose sur un système de flottation avancé utilisant des bulles d'air de taille contrôlée, capable de capter les microfibres en suspension et de les concentrer en surface, avant de les récupérer dans un compartiment dédié.

Testée avec succès dans un pressing du groupe 5àsec à Vénissieux (69), avec le soutien du CTTN-IREN*, cette technologie permet d'éliminer à ce jour plus de 90 % des microfibres plastique.

** Institut de recherche sur l'entretien et le nettoyage*



RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET PROFESSIONNALISATION

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

STOCKAGE ET GESTION DE L'ÉNERGIE

COMPRÉHENSION DES PHÉNOMÈNES DE DILATATIONS THERMIQUES DANS LES TES

Objectifs

Cette étude s'inscrit dans le cadre du stockage massif d'électricité Power to gas to power (technologies : AA CAES, batterie de Carnot), visant à renforcer la flexibilité du réseau électrique face aux variations de production.

Ces technologies de stockage s'appuient sur un élément essentiel, le stockage de chaleur ou TES (Thermal Energy Storage).

L'objectif des travaux R&D est d'améliorer la compréhension thermomécanique des interactions paroi/milieu granulaire dans les TES en lit de matériau solide soumis à des cycles thermiques. Pour cela, une enceinte thermique a été dimensionnée, instrumentée et testée en four afin de valider des modèles numériques.



Réacteur sans
son enveloppe isolante

Moyens mis en place

1. Développement de modèles analytiques et numériques simplifiés axés sur la compréhension des paramètres influents.
2. Étude de l'influence de la géométrie de l'enceinte (épaisseur, rayon) et des propriétés du matériau sur les niveaux de déformation.
3. Développement de modèles numériques avancés (prise en compte des profils réels de température, prise en compte du contact).
4. Amélioration de l'instrumentation d'essais sur four industriel pour mesurer les déformations circonférentielles induites en paroi, et valider les modèles numériques.



Résultats obtenus

Les études analytiques et numériques ont permis d'identifier clairement les principaux leviers influant sur les dilatations circonférentielles : épaisseur de paroi, module d'élasticité du matériau et conditions d'appui de la base. Certaines configurations d'enceinte type TES génèrent des déformations significatives ($>100 \mu\text{m}$). L'emploi d'aluminium (faible rigidité) conduit à des amplitudes de déformation jusqu'à quatre fois supérieures à celles obtenues avec de l'acier, et un encastrement de la base augmente notablement les contraintes en paroi. Les simulations par éléments finis, plus détaillées, confirment ces tendances, et montrent que le comportement de contact paroi/milieu granulaire influence localement les niveaux de contrainte. Sur la base de ces résultats, une instrumentation par fibre optique a été retenue : la précision et la robustesse des FO sont adaptées aux températures d'essais, et les déformations simulées sont détectables par cette méthode. Ces éléments constituent une base d'analyse essentielle pour orienter la prochaine campagne d'essais en four instrumenté, et l'exploitation des modèles pour les études ultérieures de dimensionnement de TES.

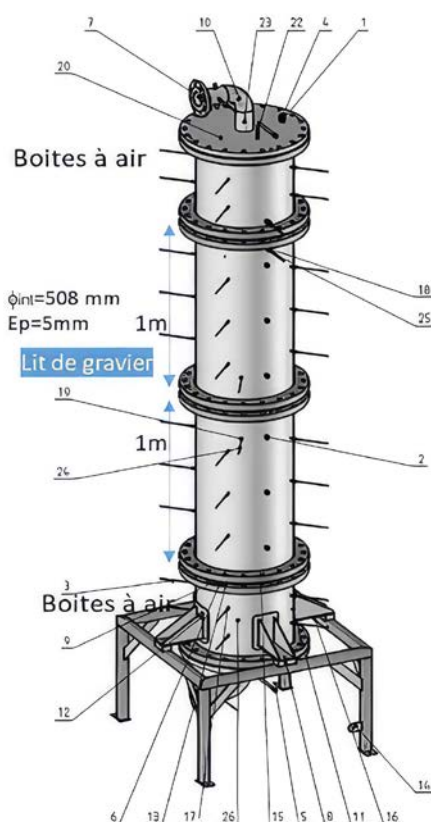


Schéma du réacteur TES avec les passages de thermocouples

NOE, LA SOLUTION EMS PRÉDICTIVE ET INTELLIGENTE QUI OPTIMISE LA RENTABILITÉ ET LA PERFORMANCE DES ACTIFS RENOUVELABLES

Objectifs

La part grandissante d'électricité renouvelable dans le mix énergétique nécessite de nouvelles solutions technologiques pour adapter la production et la consommation. Le projet EMS (Energy Management Systems) relève ce défi au travers d'une offre logicielle et matérielle, intitulée « NOE » (nouvelle optimisation énergétique), visant à maximiser l'autoconsommation et la rentabilité d'une installation impliquant une production électrique renouvelable (PV), une consommation électrique prédictible incertaine, et un moyen de stockage stationnaire pilotable (batteries).

Moyens mis en place

La mobilisation adaptée des équipes et moyens IFPEN a permis d'aboutir au développement, à la mise en production, ainsi qu'à l'évaluation des performances de la solution sur un démonstrateur interne (bâtiment Citrine, IFPEN Solaize) et un pilote commercial. Pour ce faire, une infrastructure orientée « cloud computing » (calculs déportés sur serveur) + « edge computing » (calculs embarqués sur l'installation) a permis un déploiement modulaire fluidifiant le déploiement des algorithmes sur les moyens de production et de stockage d'énergie.

Résultats obtenus

Des algorithmes de prédiction et de pilotage avancés, conçus par les équipes de recherche IFPEN, offrent une approche différenciante pour maximiser l'efficacité du pilotage et de la planification de l'exploitation de la batterie. Ces algorithmes associent avantageusement les approches basées sur la modélisation physique et les approches s'appuyant sur l'exploitation de données par apprentissage. La robustesse des algorithmes est évaluée au travers de benchmarks effectués sur des installations modélisées et réelles.

La mise en production sur serveurs tiers industriels hébergés en France (OVH) et l'implémentation d'une infrastructure cybersécurisée garantissent une souveraineté opérationnelle sur toute la chaîne de traitement.

Des gains en taux d'autoconsommation et en réduction de facture ont été constatés, à hauteur d'environ 15 %, permettant de dégager des retours sur investissement de l'ordre de 6 à 10 ans, selon les types d'installations. Ces gains ont été vérifiés en simulation et sur installations réelles.



COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES ASSOCIÉS À L'EXPLOITATION D'HYDROGÈNE NATUREL

Objectifs

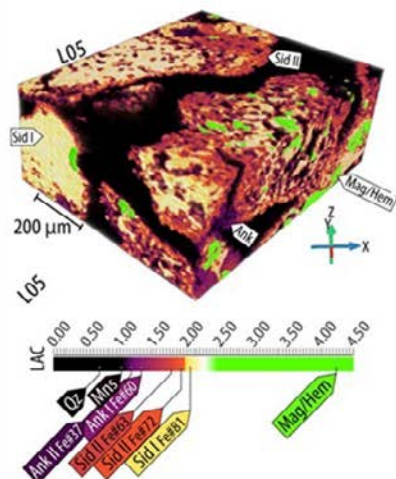
L'action proposée vise à améliorer les connaissances sur l'hydrogène naturel depuis son exploration jusqu'à son exploitation :

- Développement de méthodes d'analyse innovantes pour la quantification de la ressource
- Étude de sa consommation microbienne pour estimer sa pérennité dans des réservoirs potentiels
- Évaluation de grades d'acier adaptés pour les installations liées à sa production et à son transport

Moyens mis en place

La démarche scientifique repose sur trois tâches :

1. Quantification de l'hydrogène naturel à partir d'échantillons de roches en couplant l'utilisation d'un tomographe à rayons X avec l'analyse par microsonde de Castaing
2. Caractérisation en laboratoire des cinétiques de consommation de l'hydrogène par des microorganismes halophiles
3. Évaluation, par un dispositif expérimental de perméation, de la résistance à la fragilisation par l'hydrogène d'aciers ferritiques faiblement alliés



Résultats obtenus

La première tâche a été réalisée dans le cadre du projet interCarnot ExploH2 avec le Carnot ISIFOR, qui vise à caractériser des roches génératrices d'H₂ par tomographie couplée à un détecteur chimique spectral afin de quantifier le taux d'oxydation des minéraux composant la roche.

Le travail a porté sur la caractérisation de roches d'Amérique du Nord. La tomographie, couplée à des cartographies MEB, a permis de mettre en évidence le rôle délétère de la silice pour générer de l'H₂. En effet, une quantité trop importante de silice inhibe l'oxydation

du fer pour le piéger dans des phyllosilicates de fer secondaires. Concernant la seconde tâche, l'étude visait à évaluer l'influence de plusieurs paramètres environnementaux (température, salinité...) sur les cinétiques de consommation d'H₂ par deux microorganismes. Les résultats ont montré très peu d'activité des souches sélectionnées, conduisant ainsi à une sélection de nouvelles souches pour une suite à cette étude. Enfin, la troisième tâche a été réalisée dans le cadre du projet interCarnot AVENHYR avec le Carnot M.I.N.E.S, qui vise à évaluer le comportement de diffusion et de piégeage de l'hydrogène dans des aciers de canalisation. La première partie du projet a consisté en l'usinage des matériaux d'étude en membranes, tiges et capteurs creux. Le comportement de l'hydrogène sur ces objets sera évalué dans la seconde partie du projet en 2026.



CARACTÉRISATION DE L'INTÉGRITÉ DES Puits EN CONTEXTE STOCKAGE DE CO₂

Objectifs

Cette action vise à comprendre et maîtriser les principaux facteurs susceptibles de contribuer à la migration du CO₂ au niveau des puits, et susceptibles de contribuer à la réduction du risque de fuite dans les projets de stockage géologique du CO₂ à l'échelle réservoir.

Nous nous intéressons en particulier aux puits existants ou abandonnés, qui constituent des voies potentielles de migration, ainsi qu'aux interactions entre le CO₂ injecté et les différents matériaux qui constituent des puits.

Deux axes sont ainsi traités dans le cadre de cette action :

1. Identification et caractérisation des puits abandonnés à risque

Nous testons une méthode avancée pour identifier les puits abandonnés à risques présents dans le périmètre du stockage, via le développement d'un outil numérique de recherche Quicklook permettant d'évaluer la qualité de la fermeture des puits

2. Compréhension des interactions physico-chimiques au niveau des puits

Nous étudions les interactions physico-chimiques susceptibles de se produire au niveau des puits de stockage, dans des conditions représentatives du stockage de CO₂. Le CO₂ en phase dense est notamment considéré en interaction avec la saumure, et avec les différents matériaux présents dans les puits, tels que les roches encaissantes, le ciment et les casings

Moyens mis en place

L'outil numérique Quicklook de screening des puits fermés (iQWell) a été développé en langage Python en se basant sur l'expertise IFPEN dans ce domaine. Une interaction forte avec les utilisateurs finaux a été assurée tout au long du développement de l'outil, qui est basé sur un arbre de décision interactif.

Concernant le second mentionné en « objectifs », des expériences ont été menées sur des interfaces roches-ciment pour évaluer leur résistance mécanique avant et après vieillissement en présence de CO₂. Des expériences ont été réalisées sur des interfaces ciment-casing pour évaluer les risques de fuites aux interfaces, et évaluer la résilience du système en cas de fissure.

Des méthodologies de génération contrôlée de fissures ont été mises au point et testées pour reproduire expérimentalement les différentes configurations de dégradation.

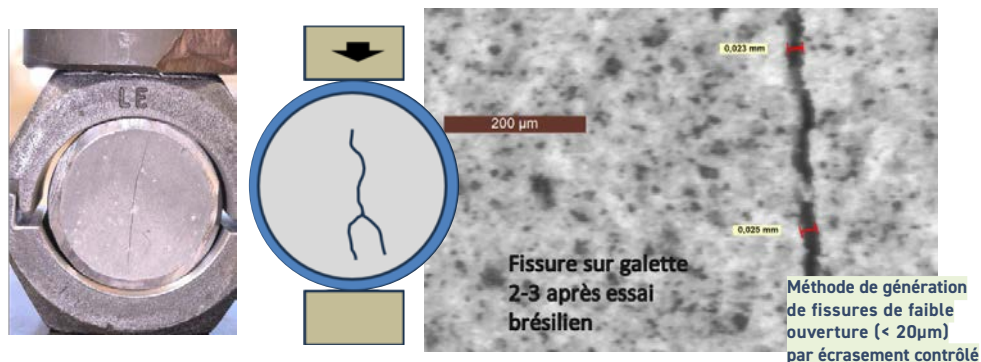


Résultats obtenus



iQWell est un outil conçu pour accélérer et faciliter l'évaluation des risques liés à la présence de puits fermés dans un stockage de CO_2 . Il repose sur une analyse documentaire approfondie, et fournit des recommandations, ainsi qu'une classification visuelle des niveaux de risques associés à chaque puits.

Différentes méthodologies de fissuration des échantillons ciment-casing ont été mises au point et évaluées pour générer des fissures contrôlées de différentes ouvertures. Une méthode par écrasement permet de générer des fissures de faible ouverture ($< 20\mu\text{m}$, voir images ci-dessous).



Des essais coreflood ont été réalisés dans des conditions représentatives du stockage géologique du CO_2 , en injectant soit du CO_2 sec sous pression (en phase dense), soit de la saumure saturée en CO_2 . Les essais ont été menés sur des échantillons intacts et non fissurés (témoins) et sur des échantillons fissurés artificiellement par écrasement. Les expériences sur les échantillons témoins avec injection de CO_2 dense montrent la bonne tenue des interfaces à la pression, ainsi que des perméabilités cohérentes avec celle du ciment (de l'ordre de $6\mu\text{D}$). Une légère réduction de la perméabilité, probablement due à la carbonatation du ciment, a été observée ($0,1\mu\text{D}$). Les expériences sur échantillons fissurés avec injection de saumure saturée en CO_2 mettent en évidence une fermeture partielle progressive de la fissure liée à des interactions entre le CO_2 , la saumure et le ciment (des $5,5\mu\text{m}$ d'ouverture initiale jusqu'à $1,5\mu\text{m}$).

Ces résultats montrent que les interfaces ciment-roche peuvent conserver leur étanchéité, y compris après l'apparition de fissures. Les méthodologies développées permettent ainsi de mieux évaluer l'intégrité des puits d'injection de CO_2 , et leur capacité à résister dans le temps à des conditions de stockage du CO_2 .

INTERACTIONS CLIMAT/SOL ET CYCLE DE L'EAU

INNOVER POUR PURIFIER : QUAND MOUSSES ET MATÉRIAUX AVANCÉS PIÈGENT LES PFAS

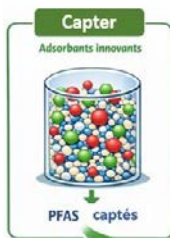
Objectifs

IFPEN vise à développer une offre de captage et de concentration des PFAS (substances per- et polyfluoroalkylées) dans l'eau. Ce projet, qui s'appuie sur les compétences IFPEN acquises sur des problématiques connexes, ambitionne de positionner l'institut comme un acteur majeur du traitement des polluants émergents. L'objectif est d'évaluer et d'optimiser les performances de deux solutions de traitement : l'adsorption et le fractionnement par mousse.



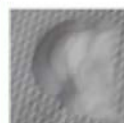
1. Concentrer : Fractionnement par mousse

- Les PFAS, tensioactifs, s'attachent à la surface des bulles et remontent en tête de colonne
- Une technologie qualifiée de rapide et peu énergivore
- Transformation d'un grand volume d'eau contaminée en un petit volume très concentré moins coûteux à détruire
- Des taux d'abattement performants même sur les courtes chaînes



2. Capter : Solides innovants

- Des solides spécifiquement développés par IFPEN à base de silice et d'alumine
- Des modifications de surface qui créent des sites capables d'attirer et de retenir les PFAS
- Ces modifications de surface boostent les performances de captage



Moyens mis en place

Il s'agit de proposer une modification de la surface de matériaux de type silice ou alumine, et d'évaluer leur capacité à capter des PFAS sur des matrices modèles, dans l'objectif de sélectionner les plus performants. En parallèle, des colonnes de fractionnement par mousse doivent être mises en œuvre afin de réaliser une étude pour optimiser la formation des bulles et l'adsorption des PFAS à leur surface. Des méthodes d'analyse quantitative sont nécessaires à l'évaluation des performances d'abattement.

Résultats obtenus

Une méthode de quantification des PFAS a été développée. Après séparation sur une colonne de chromatographie, les PFAS sont ensuite détectés par spectrométrie de masse. Cette méthode est indispensable à l'évaluation des performances des tests menés. Des mélanges de PFAS contenant des chaînes longues (PFOA) et courtes (PFBA) ont été introduits dans l'eau afin d'évaluer les taux d'abattement des solutions proposées. L'étude menée a conduit à la synthèse de 34 matériaux innovants différents, dont la texture et l'état de surface ont été caractérisés. La capacité de ces matériaux à adsorber les PFAS a été évaluée afin de mesurer l'impact des modifications apportées aux solides.

Certaines modifications de surface permettent d'améliorer nettement les performances de captage, passant de quelques pourcents d'abattement à 98 % d'abattement pour les PFAS les plus faciles à traiter, et à 50 % pour les autres. 3 solides ont été sélectionnés, et seront encore optimisés et testés afin d'évaluer leur performance par la suite (capacité, effet de la matrice à traiter...).

La seconde voie envisagée a fait l'objet de tests sur colonne de fractionnement par mousses de différents volumes. Différents paramètres ont été étudiés : type de gaz, mode de génération des bulles, type d'additif. Un jeu de paramètres satisfaisant a pu être testé en engageant 100 L d'eau à traiter. Des résultats très prometteurs ont été obtenus avec un abattement compris entre 90 et 97 % selon le type de PFAS considéré.



Colonne de flottation
à double enveloppe

MONITORING DES ÉMISSIONS DE GAZ - CARACTÉRISATION DES PANACHES GAZEUX

Objectifs

La Flair Suite, développée par le Carnot IFPEN RE, propose des outils performants de surveillance environnementale et industrielle des gaz. Après leur émission, les polluants atmosphériques se dispersent sous l'effet de la turbulence et forment un panache. Caractériser ce panache est essentiel pour identifier les caractéristiques de la fuite, notamment sa source et son débit.

Moyens mis en place

Des campagnes expérimentales de fuites contrôlées de méthane, couvrant différents débits et hauteurs d'émission, ont permis de constituer une base de données représentative de conditions réelles. En complément, des simulations CFD haute fidélité ont enrichi ces jeux de données. Leur exploitation conjointe a contribué à renforcer et affiner les algorithmes de caractérisation des fuites.



Dispositif de lâcher de méthane (système de débitmètre et mât de lâcher avec sa station météo) et véhicule de mesure de la concentration de méthane Flaircar™

Résultats obtenus

Une cinquantaine de lâchers ont permis de préciser les conditions optimales de caractérisation des fuites, et d'évaluer les performances des algorithmes. Un vent supérieur à 3 m/s, stable et bien établi, associé à une faible hygrométrie, favorise la fiabilité des estimations. La multiplication des traversées du panache permet également de renforcer la représentativité des mesures. Pour étendre les performances de la méthode à des conditions météorologiques moins favorables, l'écart entre la forme du signal de concentration mesuré et la courbe gaussienne prédite par le modèle est étudié comme indicateur de confiance. Cette méthode d'analyse prometteuse ouvre la voie à un nouvel indicateur de confiance exploitable en temps réel, renforçant encore la fiabilité opérationnelle de la Flair Suite.



Visualisation de la concentration de méthane atmosphérique en condition de lâcher avec 2 capteurs indépendants et caractérisation (débit, localisation) du point de fuite avec l'algorithme

SOLUTIONS NUMÉRIQUES POUR LE SOUS-SOL

ANALYSE MULTI-SCALAIRE ET MULTI-PHYSIQUE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DU SOUS-SOL



Objectifs

Ce projet s'intéresse à l'utilisation du sous-sol pour la transition énergétique et écologique, et notamment le stockage de CO_2 . De nombreux enjeux techniques doivent être appréhendés, notamment celui de comprendre le transport de fluides réactifs dans des formations géologiques, l'altération de ces formations au contact des fluides, et la rétroaction de cette altération sur le transport initial des fluides. L'objectif est de proposer un workflow couplant des approches expérimentales et numériques.

Moyens mis en place

Plusieurs plateformes expérimentales IFPEN ont été utilisées afin de :

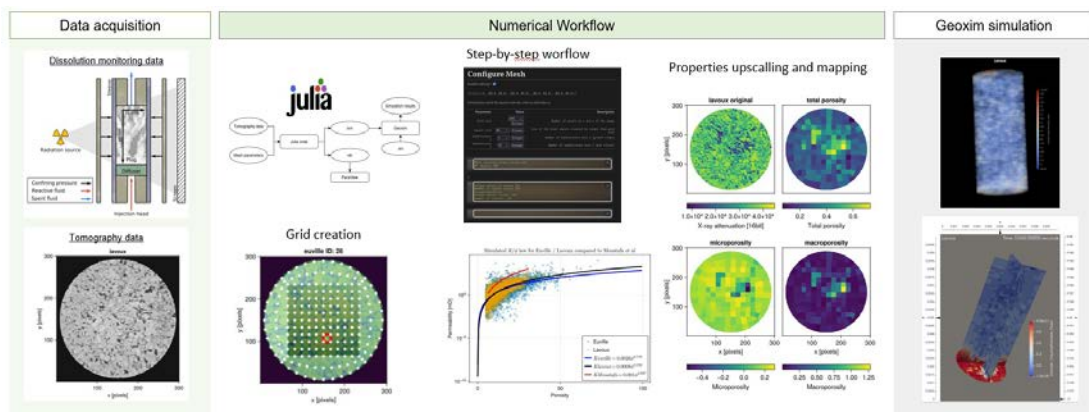
1. Caractériser les roches avec des techniques expérimentales existantes
2. Développer des expériences d'écoulement permettant de réaliser et de caractériser un écoulement réactif dans ces roches
3. Adapter des outils numériques existants pour la simulation des phénomènes physico-chimiques observés

Résultats obtenus

Un workflow numérique a été proposé afin de coupler des données expérimentales et des outils de simulation. Ce workflow permet la lecture de données issues de la tomographie 3D d'échantillons de roches, et son interprétation en propriétés pertinentes pour la simulation du transport de fluides dans le réseau poreux de ces roches. Deux étapes clés sont notamment effectuées par le workflow proposé :

1. La construction d'un maillage 3D qui sera le support de la simulation
2. La mise à l'échelle des propriétés nécessaires à la simulation vers cette nouvelle grille de simulation

Ce workflow a été appliqué sur deux roches carbonatées (un calcaire de Lavoux et un calcaire d'Euville) de composition chimique similaire mais de structure de réseau poreux différente. L'objectif était d'identifier les paramètres micro-texturaux importants à prendre en compte pour améliorer la modélisation du transport réactif. Les fluides ont été rendus réactifs en les équilibrant avec du CO_2 afin d'imiter la réactivité fluide/roche attendue dans un contexte de stockage de CO_2 .



ÉOLIEN

OUTIL NUMÉRIQUE DE PRÉDICTION DE PRODUCTION DE PARCS ÉOLIENS

Objectifs

L'objectif de l'action est d'améliorer tous les aspects du prototype numérique FarmShadow™, outil permettant d'estimer la production d'énergie d'un parc éolien de façon rapide et fidèle. Développé par le Carnot IFPEN RE, FarmShadow™ est basé sur une évaluation fine des effets de sillage venant fortement impacter le rendement du parc éolien.

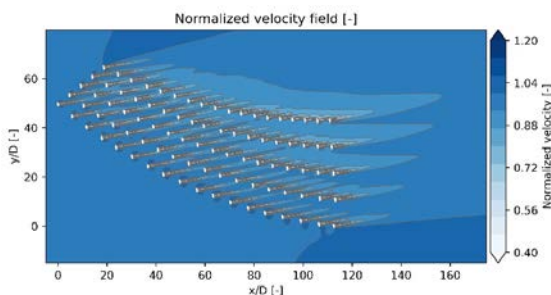
Moyens mis en place

Pour réaliser cette action, une démarche de développement de modèles physiques mais également informatiques a été mise en place. Une méthodologie de développement et intégration continue (CI/CD) a pu être renforcée. Elle était nécessaire pour capitaliser les développements dans l'outil FarmShadow™ et faciliter de futures collaborations de recherche avec des partenaires extérieurs. Une étape de validation a été mise en place afin de vérifier la validité et les limites des modèles implémentés, puis un cahier de validation a été rédigé pour communiquer sur les performances de l'outil.

Résultats obtenus

Ce type d'outil est devenu essentiel dans le secteur de la recherche et de l'industrie, aussi bien pour le design de parcs éoliens que pour les stratégies de contrôle ou de jumeau numérique de parcs. Ainsi, FarmShadow™ a été amélioré à la fois en mode stationnaire et en mode dynamique. En mode stationnaire, de nouveaux modèles ont été implémentés. Certains de ces modèles visent à réduire les temps de calcul tout en gardant un bon niveau de précision, tandis que d'autres permettent d'apporter des approches innovantes. Sur l'aspect informatique, l'action a permis une meilleure structuration du code, ce qui a amélioré la lisibilité et accéléré les temps de calcul.

Sur l'aspect dynamique, l'action a permis de proposer des solutions innovantes pour tester et valider des stratégies de contrôle de parcs en tenant compte des changements de direction du vent, mais aussi des effets atmosphériques. Une action de capitalisation et de diffusion d'un cahier de validation a été menée, le document étant désormais public et consultable, et les travaux ont fait l'objet d'une publication scientifique plus théorique. Par ailleurs, des actions concrètes d'implémentation informatique ont conduit à la sortie d'une version « Release » améliorée du prototype R&I. Enfin, une action de valorisation, en cours de finalisation, prévoit la mise en place d'un site web destiné à accroître la visibilité du prototype FarmShadow™ et notamment à l'international.





UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

Dans le cadre de leurs travaux de recherche, les équipes du Carnot IPEN RE sont engagées dans plusieurs projets nationaux et européens avec de nombreux acteurs académiques et industriels. Focus sur quelques projets collaboratifs démarrés en 2025.

ACRONYME	TITRE DU PROJET	FINANCEUR	PÉRIODE
Éolien			
FARWAKES	Characterization of offshore wind far wakes and interactions between farms	ANR	2025-2027
IDEA	<i>Conception intégrée de fermes éoliennes flottantes (tâche 49 d'IEA Wind)</i>	ADEME	2025-2025
COIN	<i>Control-Oriented INnovations for future wave energy farms</i>	Commission européenne	2025-2029
Sols : qualité, fonctionnement et pollution			
Sols-Infra	<i>Biodiversité et carbone des sols des dépendances vertes des infrastructures de transport.</i>	ADEME	2025-2029

Pour aller plus loin : notre page sur [le panorama des projets engagés en 2025.](#)

TOUT SAVOIR ET SUIVRE L'ACTUALITÉ
DU CARNOT IFPEN RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES



WWW.CARNOT-IFPEN-RE.FR



NOS ÉTABLISSEMENTS

Rueil-Malmaison

1 et 4, avenue de Bois-Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex
Tél. : +33 1 47 52 60 00

Lyon

Rond-point de l'Échangeur de Solaize
BP 3 – 69360 Solaize
Tél. : +33 4 37 70 20 00

