



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



ifpen

Ressources
Énergétiques

CARNOT IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES

2024

INNOVER POUR
DES RESSOURCES
DÉCARBONÉES
ET DURABLES



SOMMAIRE

4	CARNOT RESSOURCES ENERGETIQUES EN BREF UN ACTEUR DE LA TRANSITION ÉNERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE
6	FAITS MARQUANTS
10	GRAND ANGLE VERS UNE EXPLOITATION DURABLE DE L'HYDROGÈNE
12	ACTIONS RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET PROFESSIONNALISATION 12. STOCKAGE ET GESTION DE L'ÉNERGIE 14. RESSOURCES ET USAGES DU SOUS-SOL 15. INTERACTIONS CLIMAT/SOL ET CYCLE DE L'EAU 18. ÉOLIEN 19. SOLUTIONS NUMÉRIQUES POUR LE SOUS-SOL 22. DIGITALISATION
23	UNE DYNAMIQUE COLLABORATIVE

ANTICIPER LES TRANSFORMATIONS À VENIR



Benjamin Herzhaft,
directeur du Carnot IFPEN
Ressources Énergétiques

En 2024, les équipes du Carnot IFPEN Ressources Énergétiques (IFPEN RE) ont poursuivi avec détermination le développement et le déploiement de solutions innovantes, répondant aux défis majeurs de la triple transition écologique, énergétique et numérique.

L'hydrogène a particulièrement marqué l'année. À la demande de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), le Carnot IFPEN RE a coordonné une étude de synthèse inédite sur le potentiel de l'hydrogène natif en France. Le rapport final a été remis au ministre de l'Énergie et de l'Industrie le 1^{er} juillet 2025.

Nous avons également eu le plaisir de participer, pour la première fois, au Salon de l'Agriculture. Nos travaux sur les sols et la qualité de l'air y ont rencontré un vif succès, suscitant un fort intérêt tant auprès des acteurs institutionnels que du grand public.

Nous sommes par ailleurs très fiers de la reconnaissance reçue à travers le Prix Carnot de la recherche partenariale avec une PME-ETI, décerné à notre chef du département Physique numérique des milieux poreux. Cette distinction récompense un projet ambitieux de solution de stockage d'électricité à grande échelle, mené en partenariat avec l'entreprise STOLECT. De plus, nous avons poursuivi les actions communes engagées avec le réseau des Carnot pour la transition énergétique (RECATE).

Ce rapport annuel met en lumière nos initiatives les plus emblématiques et reflète notre engagement constant aux côtés de nos partenaires. Vous y découvrirez notamment un « Grand angle » consacré à nos recherches sur une exploitation durable de l'hydrogène (voir page 10), ainsi qu'un focus sur nos actions de ressourcement scientifique amplifiées grâce au soutien du dispositif Carnot (voir page 12).

Bonne lecture

CARNOT IFPEN RESSOURCES ENERGÉTIQUES

Le Carnot IFPEN Ressources Energétiques (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.

DÉFI 1

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

DÉFI 2

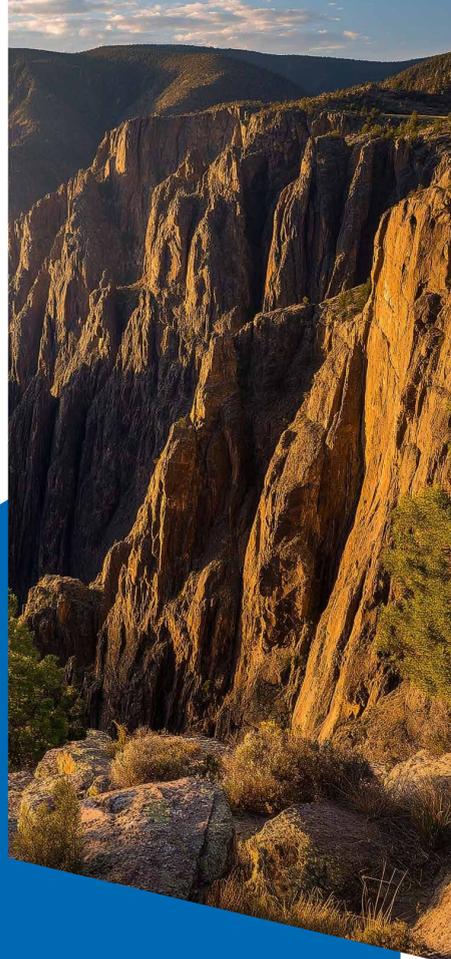
MINIMISER L'IMPACT CLIMATIQUE DES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES

- 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

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
- Mettre en place des actions de sciences participatives



QUI SOMMES-NOUS ?

IFPEN est l'Institut national pour la recherche et innovation et la formation en énergie, mobilité et environnement. Ses équipes innovent pour un monde décarboné et durable depuis les concepts scientifiques jusqu'aux solutions concrètes pour l'industrie. Procédés, équipements, produits, logiciels ou services : ses innovations bas-carbone posent les jalons de la transition énergétique et écologique et facilitent l'émergence de filières industrielles d'avenir. IFPEN imagine avec audace et conçoit avec rigueur les solutions pour la société de demain.

12



LABORATOIRES DE RECHERCHE

représentant

446

ETP DONT

95 DOCTORANTS

ET POST-DOCTORANTS



81

CONTRATS DE RECHERCHE CONTRACTUELLE

dont environ 40 % à l'international
dont :

- 10 contrats actifs de licences de technologies avec 7 entreprises partenaires
- 17 contrats de recherche contractuelle avec le monde socio-économique impliquant 12 entreprises ETI/PME/TPE nationales

BREVETS

18

BREVETS DÉPOSÉS
DANS L'ANNÉE

et

1281

DÉTENUS DANS LE PORTEFEUILLE
DE BREVETS

23

PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIVE

auxquels contribuent

34 ENTREPRISES PARTENAIRES



63

PUBLICATIONS
DE RANG A



JANVIER

**LE CARNOT IFPEN RE CO-ORGANISATEUR
DES 2^{ES} JOURNÉES SCIENTIFIQUES
DE L'ÉOLIEN**

Les 25 et 26 janvier se sont tenues les 2^{es} Journées scientifiques de l'éolien organisées conjointement par France Renouvelables et le Carnot IFPEN RE. Ce dernier était notamment en charge de la définition du programme scientifique. L'édition a rassemblé plus de 120 participants, tant académiques qu'industriels, venus assister aux 22 présentations de haut niveau sur les six thématiques retenues (1-fiabilité & maintenance, 2-contrôle de turbine, 3-production et intégration au réseau, 4-évaluation de la ressource, 5-développements technologiques, 6-impact sur l'environnement et la biodiversité).

**SOILCET : UN ÉLAN INTERNATIONAL POUR
LA RECHERCHE SUR LE CARBONE DES SOLS**

Le Carnot IFPEN RE et l'INRAE se mobilisent autour de l'enjeu crucial du sol en tant que puits de carbone. Ensemble, ils ont dynamisé la communauté scientifique en organisant le symposium international SoilCET, un événement majeur destiné à relever les défis globaux liés au stockage du carbone dans les sols.



FÉVRIER

**LE CARNOT IFPEN RE À L'AVANT-GARDE
DE L'HYDROGÈNE**

Au cours du salon Hyvolution, le rendez-vous européen des acteurs de l'hydrogène, le Carnot IFPEN RE et ses partenaires, dont le Carnot IFPEN Transports Énergie, sont venus présenter leur savoir-faire et les dernières avancées dans le domaine : formation des jeunes talents du secteur, développement des connaissances pour lever les incertitudes sur les réserves d'hydrogène naturel et les méthodes d'exploitation, sécurisation du transport de l'hydrogène en résolvant les défis liés à la tenue des matériaux et enfin, développement de la mobilité hydrogène via l'utilisation dans une pile à combustible d'une part et comme carburant d'autre part.

**LES ACTEURS DU SOUS-SOL URBAIN D'ÎLE-DE-FRANCE
ACCUEILLIS SUR LE SITE D'IFPEN-RUEIL**

Dans le cadre du « RDV des régions », le pôle Avénia, le Carnot IFPEN RE, le BRGM et le Carnot ISIFoR ont organisé une journée de travail sur le thème « Sous-sol urbain : aménagement & résilience ». L'évènement, qui a réuni une cinquantaine de participants sur le site d'IFPEN-Rueil, avait pour objectif de définir la place et le rôle du sous-sol en Île-de-France.

MARS

SALON DE L'AGRICULTURE 2024 : UNE PREMIÈRE PARTICIPATION RÉUSSIE

Pour sa 1^{re} participation au salon de l'agriculture, IFPEN a présenté ses technologies FuturoL®, BioTfuelL®, Rock-Eval® et Flair Suite™. Son stand a permis d'échanger avec le public, des industriels, des chercheurs et des acteurs institutionnels.

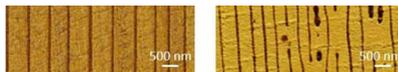


WIND EUROPE 2024 : IFPEN ET GREENWITS PRÉSENTENT LEURS SOLUTIONS POUR L'ÉOLIEN

Le Carnot IFPEN RE et GreenWITS ont partagé un stand au salon Wind Europe 2024 dédié aux technologies éoliennes. Les équipes ont présenté des innovations destinées à la conception et à l'amélioration de la performance des éoliennes et des fermes.



PROJET BYRON : DES MATÉRIAUX INNOVANTS POUR LE STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE



Le projet ANR Byron (*High-Barrier and Resistant Multilayer Polymer Structures for Hydrogen Infrastructures*), qui répond à l'appel à projet ANR « Sciences de base pour l'énergie » et qui sera mené pendant quatre ans par un consortium constitué d'IFPEN, de trois laboratoires* et d'ARKEMA a été lancé. Les équipes du Carnot IFPEN RE devront caractériser et valider les propriétés de matériaux. Elles auront également en charge le développement du modèle numérique de diffusion de l'hydrogène.

* PIMM (unité mixte CNAM, ENSAM et CNRS), leader du projet, I2M (ENSAM, université de Bordeaux, CNRS), institut PPrime (laboratoire CNRS en partenariat avec ISAE-ENSMA et université de Poitiers).

AVRIL

LA DGEC CHARGE LE CARNOT IFPEN RE D'Étudier LE POTENTIEL DE L'HYDROGÈNE NATUREL EN FRANCE



La DGEC a confié au Carnot IFPEN RE la coordination d'une étude de synthèse sur le potentiel d'hydrogène natif sur le territoire français. Les livrables concernent un état de l'art des mécanismes physico-chimiques et cinétiques de génération d'hydrogène dans le sous-sol, une identification des zones à fort potentiel sur le territoire métropolitain et dans les territoires d'outre-mer, et enfin, une synthèse des méthodes possibles de production. Le rapport final a été livré au ministre de l'industrie et de l'énergie en juillet 2025.

FOWT 2024 : L'ÉOLIEN OFFSHORE FLOTTANT TIENDRA-T-IL SES PROMESSES ?



Lors de la 11^e édition des rencontres internationales de l'éolien offshore flottant (FOWT 2024), une table ronde, animée par le Carnot IFPEN RE, avait pour thème la modélisation de l'interaction avec la houle et le vent des structures flottantes qui supportent les éoliennes. Cinq experts du domaine ont confronté leurs points de vue et leurs approches.

JUIN

EAU SOUTERRAINE : IFPEN CO-FONDATEUR DE LA CHAIRE GEEAUDE



La chaire partenariale GeEAUde « Dynamique des ressources en eau souterraine et interactions avec les écosystèmes associés », lancée par Avignon Université en partenariat avec l'INRAE et le Carnot IFPEN RE a été inaugurée. L'initiative fédère chercheurs, décideurs, gestionnaires et industriels autour d'un objectif commun : développer des outils pour caractériser et modéliser les ressources en eau souterraine et proposer des stratégies pour leur gestion durable et équitable dans le contexte méditerranéen.

LE CARNOT IFPEN RE AU RENDEZ-VOUS DES PLUS GRANDS SPÉCIALISTES DE LA BIOMASSE



Lors du congrès EUBCE à Marseille, les équipes d'IFPEN et du Carnot IFPEN RE ont présenté les avancées scientifiques et les solutions technologiques permettant la conversion de la biomasse en carburants et en intermédiaires chimiques ainsi que l'analyse de la qualité des sols.

CLÔTURE DU PROJET CHEERS : VALIDATION DE LA TECHNOLOGIE CLC

Lancé en 2017 et financé par l'Union européenne (H2020) et la Chine, le projet CHEERS s'est achevé. Il a permis de valider, *via* une unité de démonstration, la technologie CLC développée par IFPEN et TotalEnergies. Grâce à la collaboration avec Dongfang Boiler Co. et l'université de Tsinghua, plusieurs combustibles ont été testés en mode CLC autothermique. Les résultats ont été transmis à l'Europe en juin 2024.

OCTOBRE

POLLUTEC PARIS 2024 : MAÎTRISER L'EAU, C'EST MAÎTRISER L'AVENIR !



Le Carnot IFPEN RE a participé à Pollutec Paris afin de présenter ses offres dédiées à la gestion et au traitement de la ressource en eau, mais également à l'étude du rôle des sols dans la transition environnementale, à la lutte contre la pollution des microplastiques, au monitoring des gaz et à la surveillance de la qualité de l'air.

FIN DU PROJET HIPERWIND : COMMENT DIMINUER SANS RISQUE LE COÛT DES PARCS ÉOLIENS FLOTTANTS ?



Le projet européen HIPERWIND s'est achevé après trois ans et demi de travaux faisant collaborer des universités et des organismes de recherche avec un partenaire industriel. La contribution du Carnot IFPEN RE portait notamment sur la quantification et la propagation des incertitudes environnementales dans la chaîne de modélisation du sillage à l'échelle de la ferme, puis de la dynamique des structures, en comparant les outils numériques utilisés en ingénierie avec des modèles de haute-fidélité.

PROJET INTER-CARNOT : IFPEN MOBILISÉ AU SERVICE D'UNE GESTION DURABLE DU STOCKAGE DE GAZ SOUTERRAIN



Dans le cadre du projet inter-Carnot CoMiQue, les expertises de pointe d'ISIFoR et celles du Carnot IFPEN RE ont été mobilisées pour étudier le processus de la dolomitisation dans une perspective de meilleure utilisation du sous-sol pour un usage de stockage souterrain de gaz. Le Carnot RE a été sollicité en particulier afin d'avancer sur la partie modélisation et obtenir une compréhension fine des dynamiques souterraines et des interactions roche-fluide.

PRIX CARNOT : LE STOCKAGE MASSIF D'ÉLECTRICITÉ PREND LA LUMIÈRE



David Teixeira, chef du département département Physique numérique des milieux poreux au sein du Carnot IFPEN RE, s'est vu remettre le Prix Carnot de la recherche partenariale avec une PME-ETI pour un projet de solution de stockage d'électricité à grande échelle mené en partenariat avec l'entreprise STOLECT.

NOVEMBRE

EN ROUTE POUR L'HOMOLOGATION DU PROCÉDÉ DE CAPTATION DU CO₂ DMX™

IFPEN a clôturé la campagne d'essais de captation du CO₂ contenu dans les fumées de haut-fourneau sur le démonstrateur préindustriel installé sur le site d'ArcelorMittal à Dunkerque. Ces résultats, obtenus dans le cadre du projet européen 3D, vont permettre de finaliser la phase d'homologation du procédé DMX™, prérequis avant sa mise sur le marché.

VERS UNE EXPLOITATION DURABLE DE L'HYDROGÈNE

Le Carnot IFPEN RE a l'ambition de développer des technologies innovantes pour insérer l'hydrogène dans le mix énergétique et ainsi relever le défi de la neutralité carbone d'ici 2050.

En ligne avec l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, le Carnot IFPEN RE concentre ses travaux sur la production de l'hydrogène décarboné, sur son stockage et son transport.

En matière de production, les équipes développent des technologies de captage de CO₂ innovantes qui, couplées aux modes de production classique de l'hydrogène par reformage, permettent de produire de l'hydrogène bas carbone. Pour le transport et le stockage, les recherches portent sur la tenue des matériaux, notamment l'acier utilisé dans les réseaux de pipelines, ainsi

que sur le comportement de l'hydrogène dans des cavités salines ou des aquifères profonds adaptés aux besoins de stockage massif.

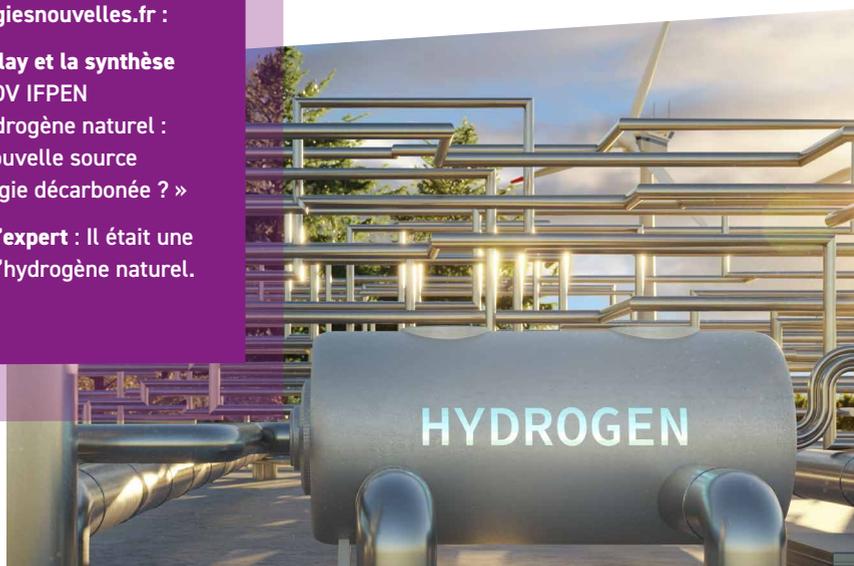
Par ailleurs, les travaux d'IFPEN portent également sur l'exploration de l'hydrogène naturel. Tout a commencé dès la fin des années 2000 avec des travaux qui ont joué un rôle déterminant dans la découverte, la compréhension et la valorisation de l'hydrogène naturel. Ces études ont été poursuivies faisant ainsi du Carnot une référence dans ce domaine.

Les travaux ont notamment permis d'identifier des zones d'émanations d'hydrogène en différents endroits à la surface de la Terre, d'étudier et de comprendre les principaux mécanismes de formation, jetant ainsi les bases d'une exploration prometteuse.

POUR ALLER PLUS LOIN

Rendez-vous sur le site ifpenergiesnouvelles.fr :

- **Le replay et la synthèse des RDV IFPEN**
« L'hydrogène naturel : une nouvelle source d'énergie décarbonée ? »
- **Avis d'expert** : Il était une fois...l'hydrogène naturel.





VERS UNE EXPLOITATION DE L'HYDROGÈNE NATUREL ?

Depuis le printemps 2023, l'intérêt pour l'hydrogène naturel connaît une accélération marquée. Dans ce contexte, le Carnot IFPEN RE joue un rôle central pour clarifier les conditions d'exploitation de l'hydrogène naturel, une ressource dont les réserves disponibles sont encore loin d'être complètement définies. Mandaté par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), le Carnot IFPEN RE a coordonné la rédaction

d'un rapport de synthèse, impliquant une quinzaine d'experts, sur l'état des connaissances sur l'hydrogène naturel dont un inventaire mondial de l'activité d'exploration et détaillant le potentiel en France hexagonale et outre-mer. Il a également organisé un dialogue avec les principaux acteurs de cette Industrie naissante pour identifier les différents obstacles au développement de la filière. Ces travaux se sont conclus par la remise d'un rapport au ministre de l'Industrie et de l'Énergie en juillet 2025.

UNE INDUSTRIALISATION ENVISAGÉE APRÈS 2035



Yannick Peysson,
responsable de programmes
au sein du Carnot IFPEN
Ressources Energétiques

L'accumulation de données plaide de plus en plus pour une origine relativement profonde de l'hydrogène naturel et divers mécanismes de formation sont maintenant connus. Cependant, les réserves restent incertaines, notamment la capacité des roches à accumuler et piéger l'hydrogène et de nombreux travaux de recherche sont encore nécessaires. Si des accumulations ou flux suffisants sont identifiés, l'extraction de l'hydrogène par forage avec un traitement minimal en surface est envisageable à des coûts attractifs. Ces perspectives expliquent l'intensification de l'exploration et l'intérêt croissant des acteurs industriels. Cependant, pour une production à grande échelle, il faudra attendre 2035-2040.



RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE ET PROFESSIONNALISATION

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

STOCKAGE ET GESTION DE L'ÉNERGIE

TENUE MÉCANIQUE DE TES SOUMIS À DES CYCLES THERMIQUES

Objectifs

Le TES (*Thermal Energy Storage*) peut être décrit, en première approche, comme un cylindre vertical en acier contenant un matériau granulaire dans lequel circule de l'air ou de l'huile. Lors de la charge, respectivement lors de la décharge, un fluide chaud, respectivement un fluide froid, entre dans le système puis un front de température se propage le long du matériau granulaire et de la paroi en acier. Ces cycles thermiques vont induire une dilatation de la paroi et du matériau granulaire. Ceci conduit à un réarrangement du milieu granulaire qui peut induire des contraintes fortes sur la paroi. Le projet consiste à étudier ce phénomène et à déterminer les contraintes à la paroi du TES après plusieurs chargements thermiques cycliques.



Moyens mis en place

Une nouvelle méthodologie a été développée en 2024. Une série de modélisations par éléments finis a été conduite. Le milieu granulaire a été modélisé comme un milieu continu avec une loi de type Drucker-Prager. Des études paramétriques du modèle numérique ont été réalisées dans un premier temps. Plusieurs types d'essais sur appareil triaxial ont été réalisés afin de pouvoir calibrer la loi de comportement des graviers. Seuls des essais de faisabilité ont été réalisés dans un premier temps. Cette loi, une fois calibrée, sera utilisée pour réaliser le design des TES.

SÉCURISER LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO₂ : AVANCÉES ET OUTILS



Objectifs

1. Analyser le couplage entre les modèles de puits et les modèles de réservoir pour mieux prendre en compte les phénomènes proche-puits pouvant impacter l'injectivité du CO₂.
2. Comprendre les conséquences des instabilités gravitaires du panache de CO₂ durant son stockage.
3. Comparer les outils de simulation réservoir permettant de qualifier la qualité des modèles et simulateurs développés ainsi que leur adéquation avec les besoins des projets de stockage de CO₂.

Moyens mis en place

Les moyens mis en place pour répondre à ces objectifs sont principalement des moyens numériques. Pour le premier objectif, des informaticiens accompagnés de développeurs des logiciels et d'ingénieurs métiers ont mis en place le couplage entre outils. Pour le second objectif, des ingénieurs en écoulements multiphasiques en milieu poreux ont établi un état de l'art solide et initié des premières simulations numériques permettant d'évaluer en première intention la criticité du phénomène. Pour le troisième, des ingénieurs métiers et les développeurs du logiciel IFPEN ont participé à un benchmark international (SPE11).

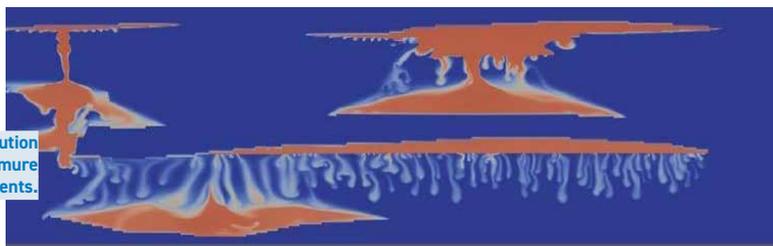
Résultats obtenus

Couplage modèle de puits/modèle de réservoir : le code de simulation des puits GWellFM et le code de simulation réservoir Geoxim ont été couplés permettant des simulations réservoirs, avec une description des conditions aux limites au niveau du puits améliorée par la simulation GWellFM ; mais aussi des simulations puits avec des conditions aux limites améliorées par les simulations réservoir Geoxim. Compréhension des conséquences des instabilités gravitaires : une bibliographie approfondie a été réalisée, permettant d'identifier les avancées et gaps des travaux sur la simulation des instabilités gravitaires.

De premiers modèles prometteurs à implémenter dans nos codes et l'identification de premières simulations numériques à réaliser pour pouvoir déterminer l'impact des instabilités gravitaires liées à la dissolution du CO₂ dense dans la saumure présente *in situ* sur le comportement du stockage et le stockage long terme du CO₂. IFPEN a participé au benchmark SPE11 portant sur la simulation thermo-hydrodynamique d'expériences d'injection de CO₂. De nombreuses équipes aux différents codes ont participé.

Le benchmark s'est conclu par la présentation d'un papier de synthèse et un workshop lors d'une conférence confirmant le très bon positionnement des outils IFPEN.

Simulation de dissolution du CO₂ dans de la saumure et de son impact sur les écoulements.



RESSOURCES ET USAGES DU SOUS-SOL

HYDROGÈNE NATUREL : INTERACTIONS AVEC LE SOUS-SOL

Objectifs

1. Mieux décrire les interactions entre l'hydrogène et les micro-organismes présents dans le sous-sol par une approche expérimentale puis par de la modélisation pour pouvoir intégrer ces processus dans des simulateurs.

2. Développer des outils d'analyse, basés sur la micro-tomographie, pour caractériser le potentiel de réactivité des roches pour l'hydrogène.

Moyens mis en place

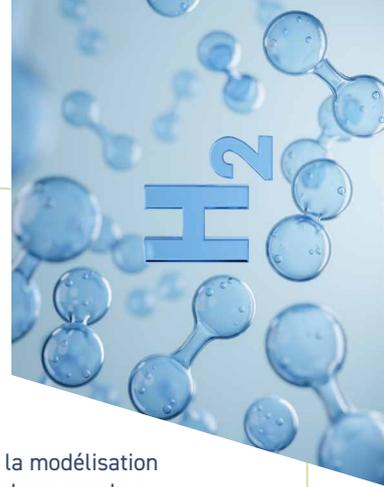
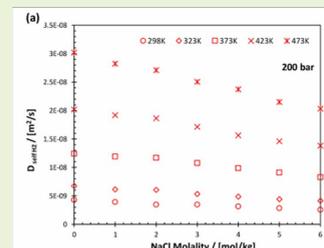
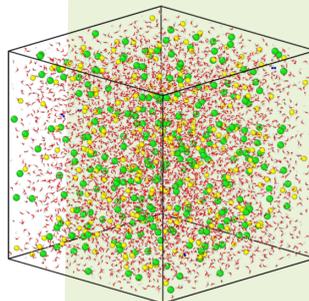
Après des études expérimentales de microbiologie réalisées les années précédentes, la méthodologie consiste à présent à modéliser les réactions de consommation d'hydrogène avant de les intégrer dans un simulateur de transport réactif. Pour la partie concernant les outils d'analyse, la méthodologie consiste à développer une méthode de quantification de l'hydrogène naturel en couplant l'utilisation d'un tomographe à rayons X équipé d'un détecteur spectral avec l'analyse par microsonde de Castaing.

Résultats obtenus

Un premier résultat obtenu a été la modélisation de réactions microbiennes pour deux souches, l'une méthanogène, l'autre sulfato-réductrice, basée sur un modèle Monod-Dual modifiée par Panfilov. Ces modèles ont ensuite été intégrés au simulateur de transport-réactif Arxim. Des simulations sur des cas synthétiques, ainsi que des cas tirés de la littérature, ont été réalisées, assurant le bon fonctionnement du modèle. Cependant, cette fonctionnalité n'en est qu'à ses prémices, et son développement est toujours en cours : il apparaît ainsi nécessaire d'améliorer la robustesse numérique lorsque la biochimie est couplée avec la réactivité géochimique. La prise en compte de la croissance de la biomasse dans le simulateur doit également être considérée. En complément de cette étude, des calculs de diffusion de l'hydrogène dans des saumures ont été réalisés pour améliorer la modélisation du transport dans le simulateur. Des calculs par dynamique moléculaire ont ainsi été réalisés pour prédire les coefficients de diffusion de l'hydrogène à différentes températures et pressions. Cette étude, menée en partenariat avec le Carnot IsiFor, a fait l'objet d'une publication commune (*Kerkache et al., soumis à Int. J. Hyd. Energy*).

Concernant le développement de la méthode d'analyse (projet ExploH2 avec le Carnot IsiFor), l'étude a été reportée à 2025.

Boîte de simulation (à gauche) contenant des molécules d'eau, de Na⁺ et Cl⁻ et d'H₂, permettant de faire des calculs de dynamique moléculaire pour déterminer le coefficient de diffusion de l'H₂ dans les saumures à différentes températures, pressions et salinités (graph. à droite).



INTERACTIONS CLIMAT/SOL ET CYCLE DE L'EAU

SUIVI MICROBIEN DES SOLS PAR L'IDENTIFICATION D'INDICATEURS : STABILITÉ DU CARBONE DANS LES SOLS ET PRATIQUES DE GESTION DES TERRES

Objectifs

1. Évaluer et identifier les paramètres Rock-Eval® (RE) pour décrire les processus de stabilisation de la matière organique (MO) dans les sols dans plusieurs types de sols, et en particulier les sols urbains.
2. Développer un outil numérique prototype (webapp RE), pour le traitement de données Rock-Eval® intégrant directement le calcul des nouveaux indicateurs de la stabilité biogéochimique de la matière organique (MO), et la quantité en carbone organique et inorganique des sols.

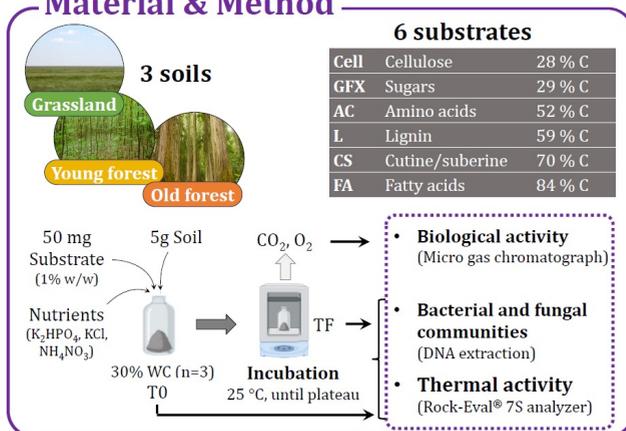
Moyens mis en place

Pour la diversité microbienne et la biodégradabilité de la MO, des incubations ont été menées sur des sols à faible teneur en carbone, des sols de prairie, des sols forestiers et des sols artificiels (argile+sable+billes de verre avec ou sans substrat cellobiose, sucre soluble ou cellulose, et inoculum lixiviat de sol de forêt) avec une analyse métabarcoding pour la diversité bactérienne et fongique, le suivi respirométrique et la quantification de la biomasse. L'analyse Rock-Eval® a été réalisée pour étudier la récalcitrance de composés chimiques issus de la biodégradabilité dans les différents types des sols testés.

Résultats obtenus

Des incubations de neuf sols avec des taux variables de *Soil Organic Carbon* (SOC) et *Soil Inorganic Carbon* (SIC) ont été réalisées, avec mesure du ^{13}C pour déterminer l'origine de ce CO_2 émis. La production de CO_2 était corrélée au taux de carbone organique initial (mesuré par Rock-Eval®), mais aucune corrélation avec le taux de carbone inorganique n'a été mise en évidence. Ces résultats suggèrent donc que les carbonates ne contribuent pas au CO_2 relargué. Les sols à fort taux de carbonate présentaient une évolution distincte des communautés fongiques et dans certains cas également des communautés bactériennes. Suite à ces résultats, des nouvelles méthodes pour étudier l'impact des communautés microbiennes et du type de substrat organique sur la stabilisation de la MO ont été mises en place. Il s'agit d'un côté d'un système de sol artificiel, dont la composition a été optimisée pour simuler au mieux un sol naturel. De l'autre côté, une méthode de quantification de la biomasse par extraction directe a été mise au point. Ces méthodes sont désormais intégrées dans nos études actuelles. Des indicateurs RE de la stabilisation de la MO en fonction de la dynamique des communautés microbiennes sont encore en cours de développement.

Material & Method



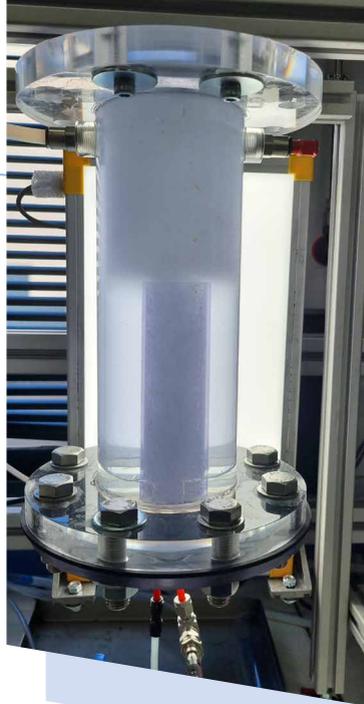
RÉCUPÉRATION DES MICROPLASTIQUES : AVANCÉES EN FLOTTATION

Objectifs

Développer et optimiser des séparateurs de flottation compacts dédiés à la récupération des microplastiques. Il apparaît alors nécessaire de mieux appréhender le processus local d'interaction bulles-microplastiques qui contrôle l'efficacité du procédé. Ces mécanismes d'interaction résultent de la combinaison de phénomènes hydrodynamiques liés à la turbulence et à la collision, et de phénomènes physico-chimiques liés à l'attachement des microplastiques sur la bulle de gaz.

Moyens mis en place

Le développement de la flottation pour la récupération des microplastiques s'articule autour de trois axes complémentaires, afin de répondre aux besoins industriels tout en assurant une efficacité optimale dans le traitement des effluents. Ces axes incluent : l'expérimentation en combinant l'hydrodynamique des fluides et la physico-chimie avec une cible de bioproduits ; la modélisation pour le dimensionnement ; et l'évaluation de l'empreinte environnementale grâce à une analyse du cycle de vie.



Résultats obtenus

Une colonne de flottation à double enveloppe, optimisée pour divers modes de fonctionnement en gaz dissous et/ou gaz induit, a été conçue, avec l'ajout d'un récupérateur de polluants innovant en haut de colonne. Le saturateur a été repensé pour améliorer la cinétique de saturation gaz/liquide, grâce à des jets de petit diamètre et la possibilité de gérer de plus forts débits afin de répondre ainsi aux besoins industriels. Une maquette pédagogique de flottation a également été créée pour sensibiliser le public et les professionnels de cette technologie comme solution de traitement des microplastiques dans l'eau. Une méthodologie de traitement d'images a été développée pour qualifier les bulles de gaz (taille, vitesse) dans la colonne, ce qui a permis de comparer différentes lois d'écoulement et d'en proposer une plus pertinente que la loi de Stokes classiquement utilisée. Un premier modèle numérique 0D a été développé pour prédire la hauteur minimale requise d'une colonne de flottation afin de capter efficacement les microfibrilles synthétiques. Parallèlement, une approche de chimie verte a été intégrée, avec des travaux d'identification d'un bio-floculant anionique pour agglomérer les microplastiques cationiques, facilitant leur traitement par flottation. Des essais sur des particules anioniques et des effluents industriels ont également été réalisés après l'évaluation d'un bio-floculant cationique mieux adapté. Enfin, une méthodologie d'analyse du cycle de vie a été proposée pour évaluer l'impact environnemental (GES, qualité d'eau) de cette technologie par rapport à d'autres solutions.

SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE ET INDUSTRIELLE : SIMULATION ET DÉTECTION AVANCÉES DE PANACHES GAZEUX

Objectifs

1. Créer des méta-modèles 3D pour simuler les panaches de gaz dans une atmosphère turbulente, en supposant une source d'émission stationnaire et en les calibrant à partir de mesures.
2. Réduire le temps de calcul de ces modèles tout en augmentant leur précision.
3. Reconstruction 3D des panaches dans des contextes connus.
4. Développer un prototype permettant d'identifier et de quantifier les fuites de gaz à partir de mesures mobiles.

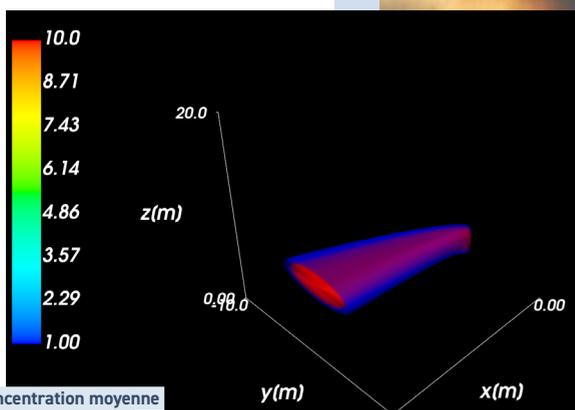
Résultats obtenus

L'environnement pour un affichage 3D a été mis en place sous Flair map afin de rendre compte de la dispersion des panaches en trois dimensions. Pour cela, il a fallu développer, mettre au point et déployer une nouvelle version de Flair map. L'erreur de remontée à la source a été quantifiée pour les essais TADI ainsi que pour le blindtest sur le site industriel d'Alfortville.

Les erreurs estimées pour les 17 lâchers à TADI (généralement entre 0,5 et 10 g/s), réalisés avec une vitesse de déplacement inférieure à 5 km/h, de multiples passages dans le panache, et utilisant le Picarro comme analyseur principal, montrent la capacité de déterminer la zone ainsi que le débit de la fuite.

Moyens mis en place

Environnement Flair map pour le stockage et l'affichage des données 3D sur fond de carte. Des calculs CFD 3D ont été lancés sur Converge pour simuler le Blindtest TADI 2019, avec l'intégration du nouvel algorithme de remontée à la source. Des blindtests supplémentaires ont été réalisés avec la Flair car sur un site industriel en générant des lâchers de méthane et d'hydrogène à des débits au niveau de la réglementation européenne.



Concentration moyenne de méthane sur une plume de dispersion 3D



ÉOLIEN

ÉTUDE DES ONDES DE GRAVITÉ ATMOSPHÉRIQUES INDUITES PAR LES ÉOLIENNES

Objectifs

La couche limite atmosphérique sur la mer est souvent surmontée d'une fine stratification stable appelée zone d'inversion, qui est située sous l'atmosphère libre également stable. Les éoliennes en mer gagnant en hauteur, leurs interactions potentielles avec ces couches stratifiées sont plus fréquentes. En conditions atmosphériques spécifiques, ces interactions peuvent engendrer des ondes de gravité, ce qui peut influencer les performances des parcs éoliens et leurs impacts environnementaux. Il apparaît donc nécessaire aujourd'hui de mieux comprendre l'apparition et la propagation de ces ondes pour accroître les performances des parcs éoliens.

Moyens mis en place

Le potentiel des fermes éoliennes à générer des ondes de gravité, mis en évidence par Smith en 2010, a été confirmé par plusieurs études numériques. Ces travaux se sont cependant focalisés sur l'échelle de la ferme, en ne détaillant pas l'analyse de l'émission et des interactions des ondes générées par chaque turbine. Une caractérisation à fine échelle de ces phénomènes permettrait de poser des bases plus sûres pour leur modélisation et leur compréhension à plus grande échelle.

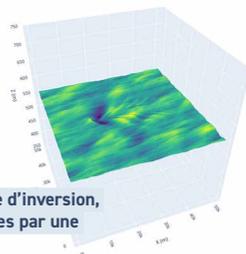
Résultats obtenus

L'abondement Carnot a permis des avancées notables dans les études d'interaction des éoliennes avec la couche limite atmosphérique avec Meso-NH*. Des améliorations méthodologiques ont été apportées. Meso-NH a été optimisé pour réduire les temps de calcul par traitement CPU, en attendant une mise à jour pour le traitement GPU.

De nouveaux contrôleurs des éoliennes (pales et couple de la génératrice) ont été développés et seront intégrés dans la version de fin 2025. Le contrôleur atmosphérique envisagé a été remplacé par une interface Python facilitant la simulation d'atmosphères spécifiques avec Meso-NH-1D.

Concernant les ondes de gravité, l'étude bibliographique s'est enrichie d'échanges directs avec les auteurs, permettant une meilleure compréhension de ces phénomènes, et de confirmer le manque d'études concernant les ondes générées par une éolienne seule. Les simulations réalisées ont révélé des similarités avec le sillage de Kelvin, offrant une base théorique pour de futures modélisations visant à améliorer les estimations de production d'une ferme. Ces résultats ont été présentés à la conférence EGU 2025 et publiés dans un journal à comité de lecture. Le sujet a été exposé à l'ADEME et à l'OFB, envisageant de rejoindre notre collaboration avec le CNRM, l'UGE et le MNHN, pour étudier les impacts sur la météorologie locale, la propagation du bruit et l'avifaune.

Comportement ondulatoire de la zone d'inversion, induit par les ondes de gravité excitées par une éolienne. Simulation Meso-NH.



* modèle atmosphérique de méso-échelle non-hydrostatique de la communauté française de recherche.



SOLUTIONS NUMÉRIQUES POUR LE SOUS-SOL

MAILLAGE POLYÉDRIQUE POUR LE SOUS-SOL

Objectifs

1. Poursuivre les travaux d'une thèse en cours sur la génération de maillage polyédrique pour la géoscience. L'idée sera de les rendre plus robustes et de travailler la mise en conformité avec des surfaces internes au volume d'intérêt.

2. Mettre en place une chaîne de génération de maillages faillés ou LGR mis en conformité. Cet objectif, de plus haut TRL que le précédent, vise une chaîne complète depuis la génération jusqu'au calculateur.

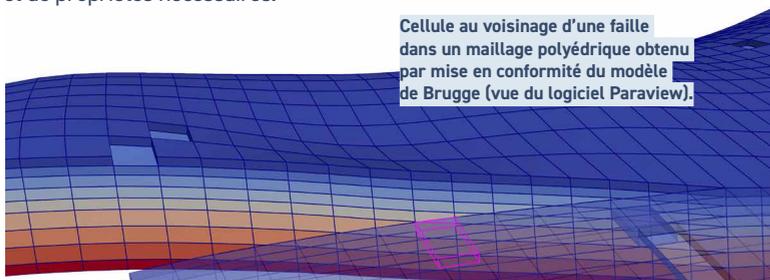
Moyens mis en place

Les actions de cette étude étant exclusivement dédiées à la modélisation numérique et donc à des développements logiciels, les moyens mis en œuvre sont uniquement des moyens humains. L'infrastructure de développements de code du Carnot IFPEN RE (chaîne de compilation, serveur de suivi de version et d'intégration continue Gitlab) a été utilisée pour réaliser ces actions.

Résultats obtenus

La génération de maillages polyédriques Voronoï conformes à des éléments internes reste un problème ouvert. Or, la conformité est indispensable car elle permet de représenter les changements de milieu (failles et horizons). Les travaux menés par le Carnot IFPEN RE sur ce sujet ont permis d'identifier des pistes pour la garantir. Parmi celles-ci, l'équipe a décidé de tester la méthode VoroCrust qui garantit les qualités d'orthogonalité des maillages Voronoï et un respect strict des bords et de l'appliquer à l'optimisation d'un maillage Voronoï conforme aux contraintes internes. Les développements réalisés en 2024 devront se concrétiser en 2025 par la finalisation d'un prototype de recherche. Sur le sujet de la mise en conformité des maillages réservoir, un prototype industriel a été développé. Pour cela, l'équipe du Carnot a dû mettre au point un algorithme de mise en conformité qui assure la validité topologique lors de la construction des cellules du niveau le plus grossier. Un deuxième algorithme, qui s'appuie sur la bibliothèque CGAL des cartes combinatoires, applique les niveaux de raffinement et subdivise les cellules par un découpage itératif suivant trois axes. Les maillages polyédriques conformes produits ont été validés grâce au simulateur Geoxim. Ces travaux ont servi de base pour établir des recommandations pour la simulation des cas géologiques complexes en termes de formats de fichiers, d'identification de groupes de mailles et de faces et de propriétés nécessaires.

Cellule au voisinage d'une faille dans un maillage polyédrique obtenu par mise en conformité du modèle de Brugge (vue du logiciel Paraview).



FONCTIONNALITÉS AVANCÉES DANS LE SIMULATEUR PROTOTYPE MULTIPHYSIQUE EN MILIEU POREUX GEOXIM

Objectifs

Améliorer les fonctionnalités avancées du simulateur prototype Geoxim, dédié à la simulation de processus multi-physiques en milieu poreux. Deux aspects sont abordés. Le premier porte sur la simulation de la formation/dissociation d'hydrates de CO_2 lors de l'injection de CO_2 dans un réservoir dépleted : il s'agit de traiter le contexte de mélanges multiphasiques où le nombre de composants est inférieur au nombre de phases. Le second concerne le couplage entre les écoulements et la déformation mécanique du sous-sol pour lequel on ajoutera la rétroaction de la mécanique sur les écoulements.

Moyens mis en place

Ces travaux sont menés par des ingénieurs de recherche en calcul scientifique en suivant une démarche similaire en trois étapes : dérivation théorique de la formulation retenue, implémentation informatique dans le simulateur Geoxim puis validation par rapport à des solutions de référence, exactes s'il en existe.

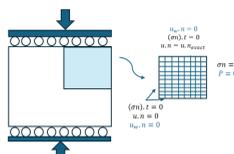
Résultats obtenus

Prise en compte du contexte « plus de phases que de composants » : Le simulateur Geoxim est basé sur une discrétisation temporelle implicite des écoulements multiphasiques. Elle conduit à la résolution d'un système algébrique non linéaire à chaque instant de calcul qui doit être formulé de façon compatible avec la prise en compte de la disparition ou l'apparition d'une phase. Dans Geoxim, on utilise une formulation de Coats qui définit un ensemble de contextes représentant la combinatoire des phases présentes. Pour chaque contexte sont définies les inconnues principales, secondaires et les équations associées de telle sorte que le système est bien posé. Pour le cas où le nombre de phases égale le nombre de composants plus un, un nouveau contexte est introduit où la température devient une inconnue secondaire associée à une équation d'équilibre alors qu'elle est habituellement associée à l'équation d'énergie.

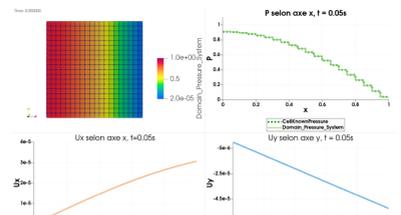
Rétroaction de la déformation mécanique sur l'écoulement : La formulation de la rétroaction de la déformation mécanique sur l'écoulement fait partie des modèles poro-mécaniques classiques et correspond à un terme de variation de volume poreux fonction de la trace du tenseur des déformations et de la pression. Néanmoins, cette formulation n'est pas directement applicable à un modèle d'écoulement tel que celui considéré dans Geoxim qui tient compte explicitement des espèces en phase solide. On a donc proposé une nouvelle formulation où l'impact de la mécanique sur l'écoulement agit sur le volume total et la masse volumique des phases solides. L'approche a été validée sur le cas test de Mandel.

COUPLAGE POROELASTIQUE VALIDATION SUR TEST DE MANDEL

- Problème poroélastique linéaire $\nu = 0.25, b = 0.8$
- Compression instantanée d'une plaque rectangulaire
- Durée de simulation 1s, $\Delta t = 1. \cdot 10^{-4}$ s



- Comparaison par rapport à la solution exacte
- Algorithme de fixed-stress avec $\gamma = 2$, critère d'arrêt serré, 2 à 10 itérations de couplage



TRANSPORT RÉACTIF À L'ÉCHELLE DU BASSIN SÉDIMENTAIRE

Objectifs

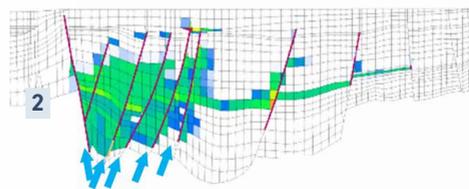
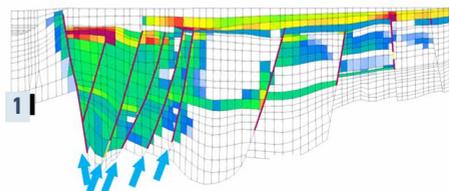
Développer une technologie dont l'objectif futur est de prédire la genèse, la migration et la localisation de réserves, à l'échelle du bassin sédimentaire, de constituants chimiques comme l'hydrogène, l'hélium ou le lithium. Ce type d'outil sera notamment destiné à l'exploration de l'hydrogène natif, de l'hélium, et du lithium dissous, mais pourra également permettre de mieux comprendre l'hydrodynamisme « très profond » dans le cadre des nouveaux usages du sous-sol comme le CCS ou la géothermie.

Moyens mis en place

Il s'agit de faire évoluer un code informatique ArcTem de simulation numérique des bassins sédimentaires initialement développé pour l'exploration des hydrocarbures. Ceci consiste à concevoir les nouveaux modèles physiques à prendre en compte, déterminer les schémas mathématiques les mieux adaptés pour les simuler numériquement, implémenter ces schémas dans le code, et construire des cas d'application pour tester leur bon fonctionnement.

Résultats obtenus

Le code ArcTem réalise une simulation diphasique des écoulements dans un bassin sédimentaire. La phase aqueuse peut transporter des éléments dissous comme l'hydrogène, le sel ou le lithium. La seconde phase comporte un constituant sous forme de gaz libre. Au démarrage du projet, ArcTem ne donnait pas la possibilité de simuler l'échange de ces constituants dissous avec les minéraux de la roche en place. Nous avons développé une version prototype d'ArcTem qui donne la possibilité de les prendre maintenant en compte à l'aide d'un schéma numérique de type « *operator splitting* » selon lequel on enchaîne, lors de chaque pas de temps, un calcul du transport seul, puis un « réacteur géochimique » qui calcule l'échange d'un nombre indéterminé de constituants entre la roche et le fluide. Un premier réacteur géochimique a été mis en place pour modéliser la consommation bactérienne de l'hydrogène dissous. Pour ce faire, nous avons utilisé une loi de dégradation d'ordre 1, avec un taux de dégradation dépendant de la température suivant le formalisme de *Rosso et al* (1993). Pour la modélisation du lithium, nous avons réalisé une étude bibliographique pour rechercher les différents types d'interaction fluide-roche à prendre en compte, mais le temps imparti au projet n'a pas suffi à les implémenter dans le code ArcTem. La modélisation de la consommation bactérienne de l'hydrogène a été appliquée au cas d'un système hydrogène fictif dans le bassin de Perth (Australie) et au cas réel du système hydrogène du Kansas. Ces simulations ont montré que seul un taux de sommation très bas peut permettre la formation d'une accumulation d'hydrogène libre.



Saturation en hydrogène libre calculée dans une section 2D, pour le cas du système hydrogène fictif de bassin de Perth (Australie),

1. sans consommation bactérienne,
2. avec une consommation bactérienne maximum de 0,5% par an à des températures inférieures à 90°C

DIGITALISATION

FLASH THERMODYNAMIQUE : BOOSTER LES CALCULS GRÂCE À L'IA

Objectifs

Améliorer la performance des calculs de flash thermo-dynamique en intégrant des approches d'intelligence artificielle. Plus précisément, un réseau de neurones est développé pour estimer les coefficients de partage des composés, afin d'accélérer la résolution des équilibres triphasiques incluant des hydrates. Cet outil sera ensuite couplé aux simulateurs géosciences, afin de valider son applicabilité à grande échelle.

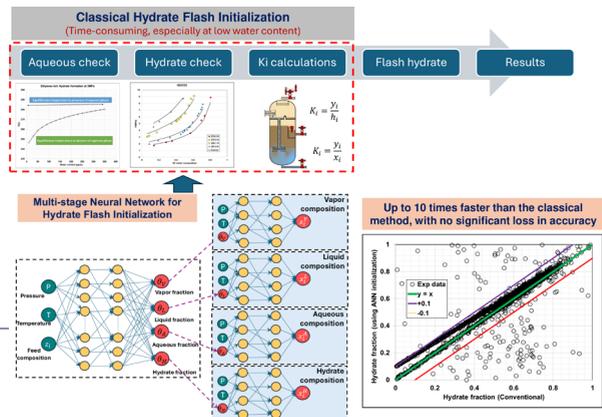
Moyens mis en place

La démarche suivie dans cette étude repose sur 4 principales étapes :

1. Construction de la base d'apprentissage *via* la génération de données issues de calculs thermodynamiques avec Carnot.
2. Développement du réseau de neurones visant à prédire les coefficients de partage des constituants.
3. Implémentation du modèle dans la librairie thermodynamique Carnot d'IFPEN.
4. Évaluation des performances et validation *via* la comparaison des résultats obtenus avec des approches classiques.

Résultats obtenus

Les résultats obtenus montrent une amélioration significative de la performance des calculs de flash thermodynamique triphasique en présence d'une phase hydrate, en complément de deux phases liquide et vapeur, grâce à l'intégration d'une approche liée à l'intelligence artificielle. Différentes stratégies de construction du réseau de neurones ont été explorées afin d'optimiser la précision des résultats et l'efficacité de calcul. La sélection des hyperparamètres, la profondeur du réseau ainsi que les fonctions d'activation ont été ajustées pour améliorer la qualité des prédictions des coefficients de partage des constituants en fonction des conditions thermodynamiques. Les comparaisons avec les approches classiques ont montré que cette méthode permettait de réduire considérablement le coût computationnel tout en maintenant une précision équivalente. L'intégration réussie du modèle dans la librairie thermodynamique Carnot d'IFPEN a facilité son exploitation dans les simulateurs géosciences de la plateforme Arcane, rendant son utilisation pertinente pour des études industrielles complexes. Des tests sur des cas concrets, notamment dans le cadre du stockage et du transport de gaz, ont confirmé la robustesse du modèle et son intérêt pour des simulations à grande échelle. Ces avancées ouvrent la voie à une adoption plus large de l'intelligence artificielle dans la modélisation thermodynamique, avec des applications potentielles dans divers domaines liés à la transition énergétique.





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. Focus sur les projets démarrés en 2024.

Pour un panorama complet des projets dans lesquels le Carnot IFPEN RE est engagé, flashez le QR code.

ACRONYME	TITRE DU PROJET	FINANCEUR	PÉRIODE
Éolien			
CAP	Contrôle Avancé des Parcs éoliens	ANR	2024-2028
Hydrogène			
Cai Yuanpei - Tremplin 2024	<i>Dynamique des gaz en sous-sol pour la transition énergétique</i>	Ministère	2024
FRHYGE	<i>Full qualification in France of large-scale Hydrogen underground storage and replication from Germany to all European countries</i>	Commission européenne	2024-2028
HYSTORY	<i>Mn austenitic stainless and non-stainless steels for hydrogen applications: production, transport and storage</i>	Commission européenne	2024-2028
Sols : qualité, fonctionnement et pollution			
DEEPHORIZON	<i>DEploying Ecosystemic solutions to imProve soil Health and unCOveRing subsoil functions in the critical ZONE</i>	Commission européenne	2024-2028
MICE	<i>Microbial CO₂ exchanges in peatlands: contribution to peatland carbon pool and response to climate change</i>	Commission européenne	2024-2028
Sous-sol (ACV et risques)			
INITIATE	<i>Climate tectonics interactions using big data-informed models</i>	Commission européenne	2024-2028
Gestion de la ressource eau			
Aquimer	<i>Caractérisation des aquifères côtiers selon un continuum terre-mer</i>	ANR	2024-2028

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



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

