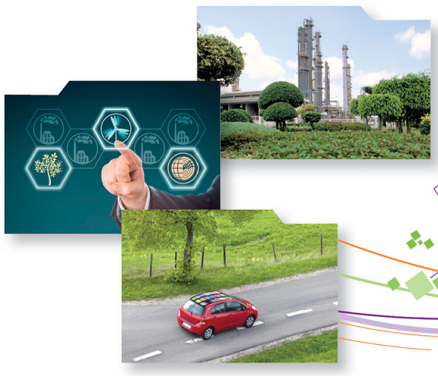
Science@ifpen
N° 46 - Novembre 2021



Rédigé le 17 novembre 2021

15 minutes de lecture

Actualités

Recherche fondamentale



Comme le confirme le récent rapport du GIEC, la transition énergétique et écologique est plus que jamais indispensable pour combattre le réchauffement climatique et aller vers un développement durable, en passant d'une économie carbonée à la neutralité carbone en 2050.

Au sein d'IFPEN, la direction Sciences de la Terre et Technologies de l'Environnement est actrice de cette ambition. Forte de son expertise historique, acquise dans le domaine des hydrocarbures, elle évolue et met ses compétences au service du développement d'innovations pour apporter des solutions aux défis sociétaux et industriels de l'énergie et du climat. Pour cela, la direction s'appuie sur un socle de connaissances lui permettant de caractériser, de comprendre et de modéliser le sol, le sous-sol et les fluides qui s'y écoulent. Elle bénéficie également d'un parc de laboratoires très large qui couvre les domaines de la géochimie et de l'analyse des gaz, du transfert de fluides complexes en

milieux poreux, de la thermodynamique et de la caractérisation des matériaux.

La direction couple ainsi avantageusement la caractérisation à toutes les échelles (depuis le laboratoire jusqu'au terrain), avec le développement de modèles et simulations capables de restituer numériquement le comportement des milieux étudiés. La combinaison caractérisation-modélisation est aujourd'hui renouvelée avec des approches issues de la science des données. Les capacités expérimentales de la direction lui permettent de mener les travaux depuis la connaissance et la compréhension des systèmes impliqués jusqu'au développement d'objets technologiques.

Vous trouverez dans ce numéro de Science@ifpen un aperçu des sujets traités aujourd'hui par les chercheurs de la direction, illustrant le profond renouveau des thématiques de recherche ces dernières années et les apports féconds de la pluridisciplinarité, que ce soit au sein d'IFPEN ou via les collaborations avec des équipes académiques ou des partenaires industriels.

Je vous souhaite une bonne lecture,

Benjamin Herzhaft
Directeur de la direction Sciences de la Terre et Technologies de l'Environnement

LES BRÈVES

Parmi les leviers pour abaisser la concentration de CO_2 dans l'atmosphère figure bien sûr la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile, mais il est aussi possible d'accroître les quantités de carbone stockées dans les sols. Cette option met en jeu la matière organique du sol (MOS), classée en trois groupes fonctionnels suivant la vitesse à laquelle elle se dégrade en CO_2 : rapide (de quelques jours à un an), intermédiaire (de quelques années à quelques décennies) ou lente (de plusieurs décennies à plus d'un siècle). En lien avec la composition chimique de la matière organique, le temps de résidence de cette dernière dans le sol dépend à la fois de ses interactions avec les minéraux présents et de sa minéralisation induite par l'action des microorganismes.

Dans le contexte actuel de dérèglement climatique, connaître l'évolution du carbone dans les sols devient un enjeu critique. C'est pourquoi IFPEN s'est intéressé au potentiel du Rock-Eval®, un fleuron de la recherche pétrolière, comme moyen d'effectuer cette caractérisation de manière fiable et rapide. Celui-ci repose en effet sur des analyses thermiques bien plus simples que les protocoles de fractionnement et d'incubation proposés aujourd'hui dans les sciences du sol et de l'environnement. L'efficacité de la méthode, qui consiste à soumettre les échantillons à des programmes de chauffe (pyrolyse et combustion), a été largement démontrée dans le domaine pétrolier pour caractériser la matière organique, aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif[1]. En différenciant des fractions de carbone de différentes stabilités thermiques (labile[a], résistante et réfractaire), la méthode permet de retrouver aussi les différentes catégories fonctionnelles de la MOS et de rendre compte de l'aptitude des échantillons à se minéraliser.

C'est ainsi qu'une méthode originale utilisant le Rock-Eval® a été récemment développée à IFPEN pour mieux quantifier le carbone organique (COS) et inorganique (CIS) du sol (brevets en cours), tout en permettant de mieux appréhender la stabilité du COS. A cet égard, deux nouveaux critères fonctionnels basés sur l'analyse du thermogramme de pyrolyse ont été identifiés pour représenter et suivre sur un diagramme les dynamiques de minéralisation et de stabilisation du carbone[2].

Cette nouvelle approche a été appliquée à une série d'échantillons de sols prélevés à différentes profondeurs dans une hêtraie située dans une forêt domaniale de Normandie, dont la gestion est documentée depuis 200 ans[3]. Cette étude a mis en évidence une relation entre la granulométrie des fractions du sol et la stabilité thermique de la MOS qui rend probablement compte de sa stabilité biogéochimique. Ces résultats de terrain ont été corroborés par des expériences d'incubation sur sol modèle (figure 1), qui ont établi le lien entre la diversité microbienne, la complexité moléculaire et la stabilité thermique de la MOS[4]. De même, on a pu étudier l'impact de l'ajout d'un mélange entre biochar[b] et engrais organiques sur la fertilité et la séquestration du carbone à long terme dans le sol[5] .

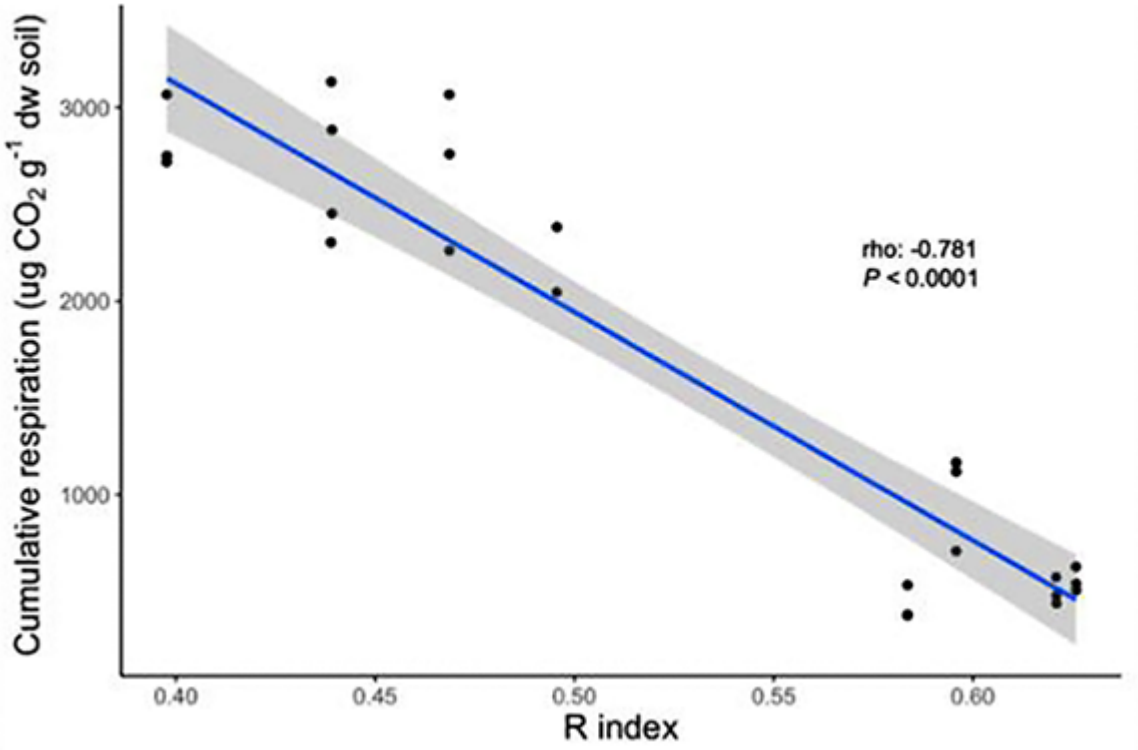


Figure 1 : Détermination du CO2 généré par la minéralisation de la MOS
(R-Index : descripteur de la stabilité du COS issu de l'analyse Rock-Eval®) [4]

Ces nouvelles compétences d'IFPEN sont d'ores et déjà impliquées dans des projets collaboratifs :

- un projet ANR visant à mieux comprendre l'impact des plastiques sur l'écosystème des sols[6] ;
- un projet du Belmont Forum qui s'intéresse à l'impact des changements climatiques récents et des usages de sols arctiques et équatoriaux sur le stockage du carbone[7].

Originales et prometteuses pour la caractérisation du carbone dans les sols dans de nombreux contextes pédologiques[c] et agronomiques (figure 2), ces activités illustrent la capacité d'IFPEN à opérer des transferts d'expertise pour répondre aux enjeux de la transition environnementale.

Cliquer sur l'image pour l'agrandir

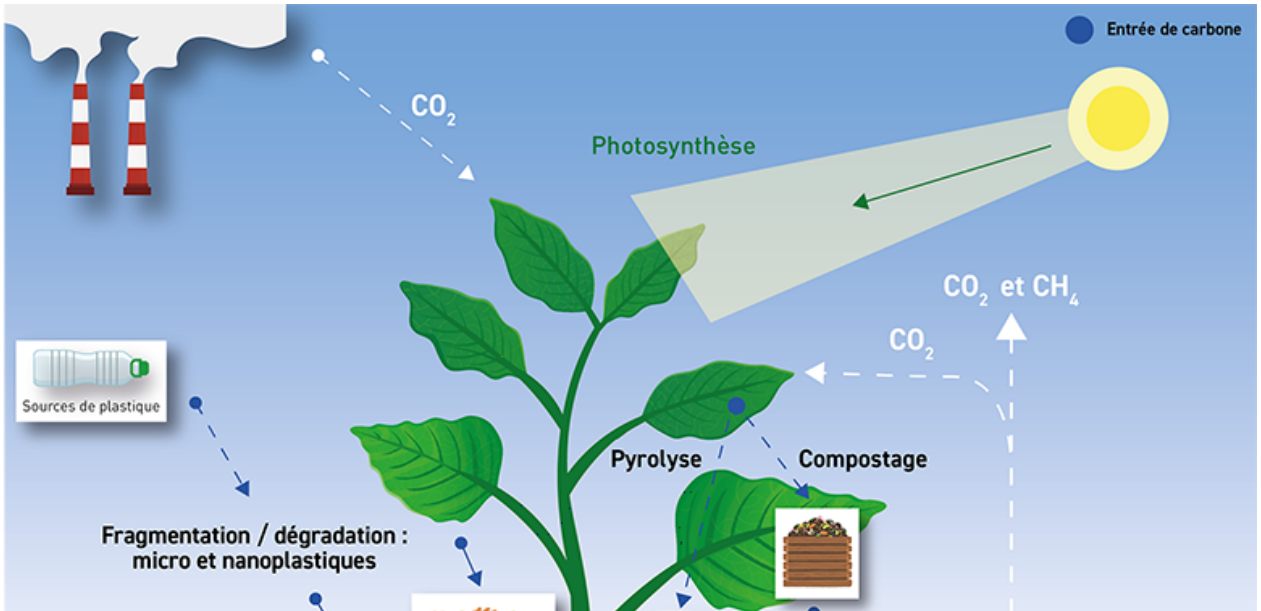


Figure 2 : Illustration des recherches menées à IFPEN

a- Peu stable.
b- Résidu solide riche en carbone obtenu par pyrolyse de matières organiques d'origines diverses (résidus agricoles, fumier, résidus d'exploitation forestière, etc.).
c- Relatifs à l'étude des sols.

Références :

[1] https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/breve/rock-evalr-analyse-thermique-des-roches-et-des-sols

[2] *Sebag D., Verrecchia E.P., Cécillon L., Adatte T., Albrecht R., Aubert M., Bureau F., Cailleau G., Copard Y., Decaens T., Disnar J.-R., Hetényi M., Nyilas T., Trombino L., 2016. Geoderma 284, 185-203.* https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.025.

[3] *Sebag D., Verrecchia E.P., Adatte T., Aubert M., Cailleau G., Decaens T., Kowalewski I., Trap J., Bureau F., Hedde M., 2021. Pedosphere, 2021, in press.*

[4] *Domeignoz-Horta L. A., Shinfuku M., Junier P., Poirier S., Verrecchia E., Sebag D., De Angelis M., ISME COMMUN., accepté (preprint* https://doi.org/10.1101/2021.04.23.441131*).*

[5] *Aubertin M.L., Sebag D., Jouquet P., Girardin C., Houot S., Kowalewski I., Lamoureux-Var V., Pillot D., Rumpel C., 2021. Eurosoil 2021 (virtual congress), 23-27 août 2021, communication orale.*

[6] *Projet ANR e-Dip : « Dynamique environnementale et impacts des cocktails de contaminants provenant des plastiques dans les écosystèmes terrestres ». Coordinateur du projet : Marie-France Dignac, INRAE, iEES Paris.*

[7] *Projet VULCAR-FATE : « Global change impact on vulnerable carbon reservoirs: carbon sequestration and emissions in soils and waters From the Arctic To the Equator », financé par le Belmont Forum. Coordinateur du projet : Jean-Jacques Braun, IRD, Géosciences Environnement Toulouse.*

Contact scientifique : isabelle.kowalewski@ifpen.fr

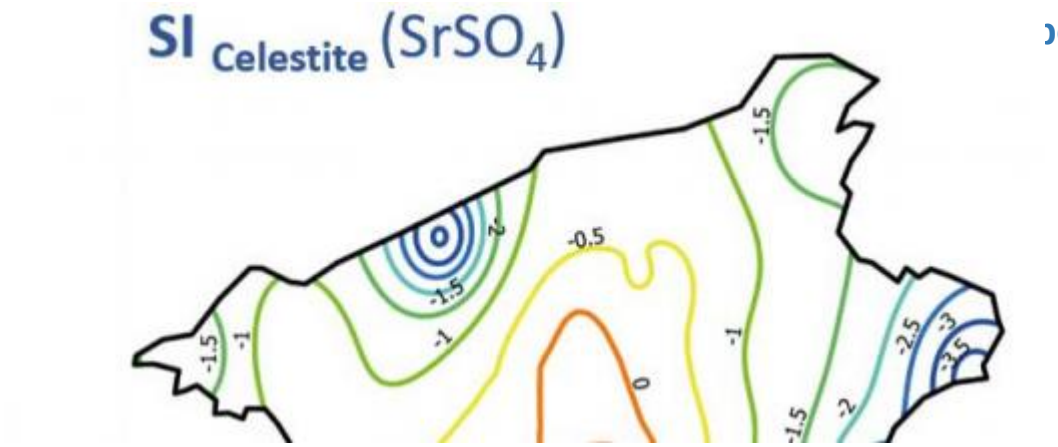
>> NUMÉRO 46 DE SCIENCE@IFPEN

VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR



Innovation et industrie

Actualités novembre 2020



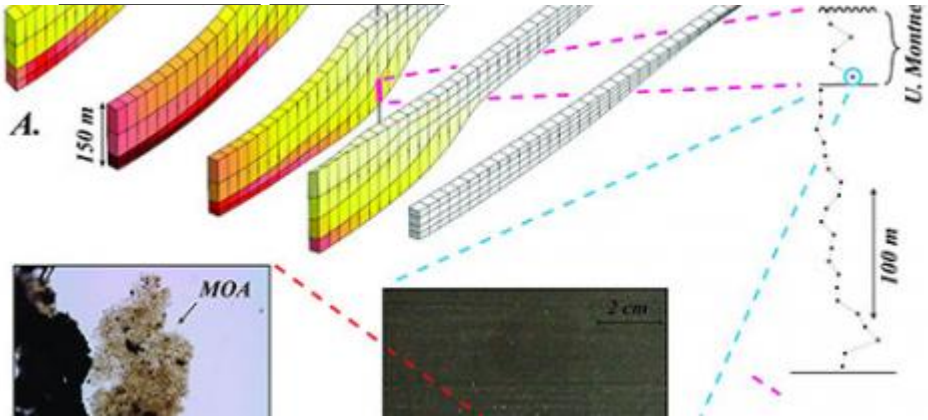
ɔour Rock-Eval® 7S

Recherche fondamentale

Actualités février 2020

Transition énergétique et géothermie : des connaissances qui ne coulent pas de source

Énergies renouvelables Géothermie



Rock-Eval® : pour aller plus loin

Méthodes analytiques (détails), interprétation pour l’exploration pétrolière, littérature

Hydrocarbures responsables **Modélisation et simulation des bassins et réservoirs**

Carnot IFPEN Ressources Energétiques

Rock-Eval® : au service de l’étude des sols pour l’enjeu climatique

L’impact du changement climatique et des activités anthropiques sur l’évolution des paysages et des ressources en eau constitue aujourd’hui un enjeu majeur. Sa prévision nécessite de disposer d’outils dédiés capables d’évaluer à un horizon de 100 ans les conséquences de différents scénarios sur les bassins versants et les eaux souterraines.

IFPEN développe à cette fin des approches de modélisation des phénomènes d’érosion-transport-dépôt couplés aux écoulements de surface et de subsurface. IFPEN s’appuie pour cela sur ses compétences historiques dans le domaine des sciences de la Terre, en particulier la modélisation stratigraphique[1] et le transport multiphasique dans les milieux poreux complexes. Les modèles mis au point visent à prévoir l’évolution de l’érodabilité des sols, des flux de sédiments dans les fleuves et rivières, des zones d’inondation potentielles, de la recharge quantitative et qualitative des aquifères, etc. L’objectif est de définir des cartes de risques qui permettront d’aider les acteurs locaux à adapter les plans de prévention des risques et les projets d’aménagement.

La « zone critique », qui s’étend de la canopée à la roche saine non-altérée, est naturellement au cœur de ces problématiques. Elle est soumise à l’érosion des sols, qui peut induire des coulées boueuses dévastatrices lors d’épisodes de pluie extrêmes. De plus, l’érosion entraîne des pertes de matière organique qui perturbent les écosystèmes et qu’il est donc essentiel de caractériser. Modéliser ces phénomènes implique de comprendre l’influence de la couverture végétale et de l’occupation humaine, au travers d’une démarche scientifique qui s’appuie sur l’étude de systèmes passés récents (depuis -10 000 ans jusqu’à nos jours)[2].

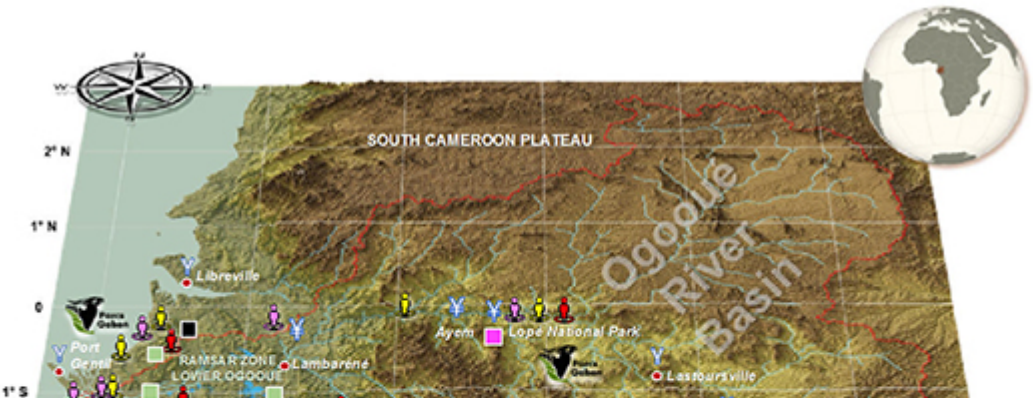
Sélectionné dans le cadre de l’appel à projets du Belmont Forum « Vers la durabilité des sols et des eaux souterraines pour la société », le projet international VULCAR-FATE[a] [3] a été lancé en juin 2021 avec deux objectifs majeurs :

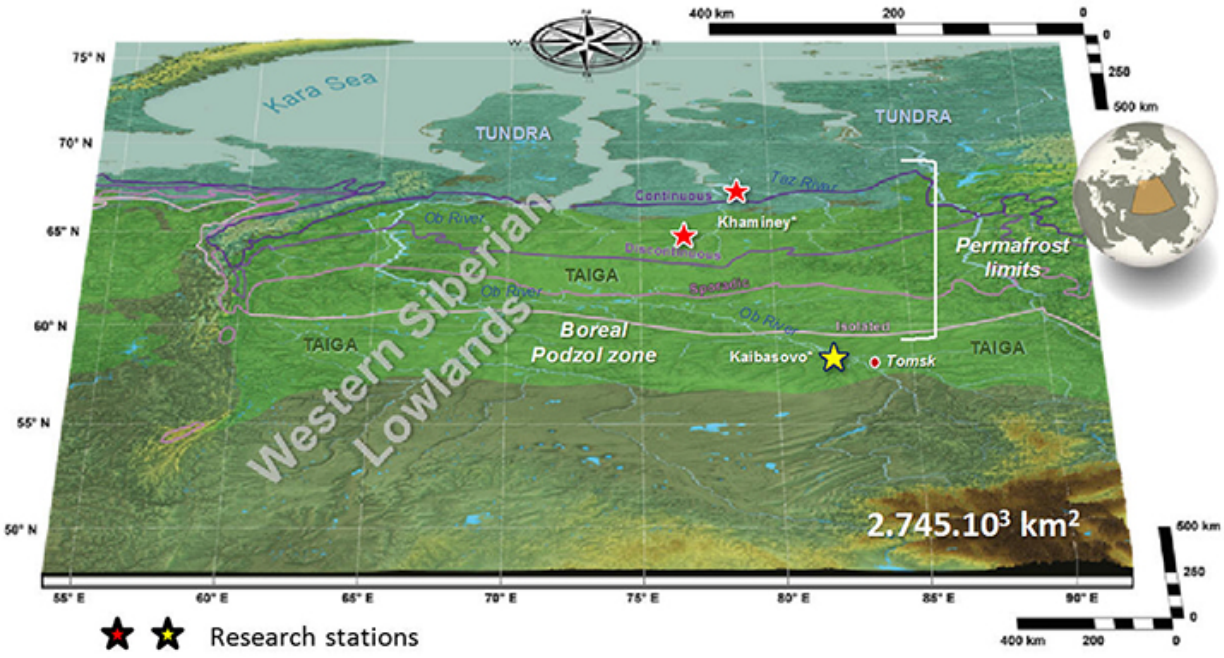
- étudier deux écosystèmes (figure), l’un au Gabon, l’autre en Sibérie, afin d’évaluer l’impact des changements climatiques récents et des usages des sols sur le bilan hydrique et le transport de sédiments et de matière organique, ainsi que sur la dégradation des sols pouvant entraîner l’émission de carbone dans l’atmosphère ;

- définir des scénarios d’évolution à 30-100 ans en vue d’adapter les politiques locales.

Les chercheurs d’IFPEN apporteront leurs compétences à travers, d’une part, la modélisation des processus géologiques et des flux d’eau et de sédiments au sein de DionisosFlow™ et, d’autre part, la caractérisation de la matière organique des sols grâce à la méthode Rock-Eval®. Les modèles développés permettront d’intégrer l’ensemble des données acquises durant le projet.

Cliquer sur les images pour les agrandir





VULCAR-FATE project study sites

a- *Global change impact on vulnerable carbon reservoirs: carbon sequestration and emissions in soils and waters From the Arctic To the Equator* : projet interdisciplinaire, coordonné par l'IRD et regroupant des partenaires de six pays (France, Etats-Unis, Russie, Gabon, Espagne et Suisse).

Références :

[1] *Csato I., Catuneanu O., Granjeon D. (2014). Journal of Sedimentary Research, 84.* http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2014.36.

[2] *Bremond L., Oslisly R., Sebag D., Bentaleb I., Favier C., Henga-Botsikabobe K., Mvoubou M., Ngomanda A., de Saulieu G., Ecotrop Team (2021). The Holocene, 33(7).* https://doi.org/10.1177/09596836211003230.

[3] *Vidéo de présentation du projet VULCAR-FATE.* https://www.youtube.com/watch?v=BOkhcuJocB0

Contacts scientifiques : elisabeth.bemer@ifpen.fr, Didier Granjeon, david.sebag@ifpen.fr et benoit.chauveau@ifpen.fr

>> NUMÉRO 46 DE SCIENCE@IFPEN

VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR

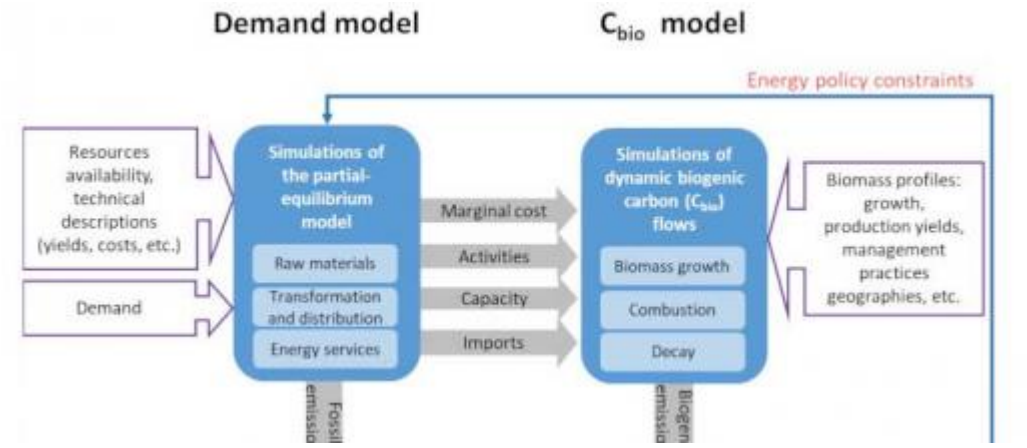


Recherche fondamentale

Actualités septembre 2020

Le Docteur David Sebag vient renforcer les rangs IFPEN dans le domaine de la Science du sol

Climat, environnement et économie circulaire | Captage, stockage et valorisation du CO2

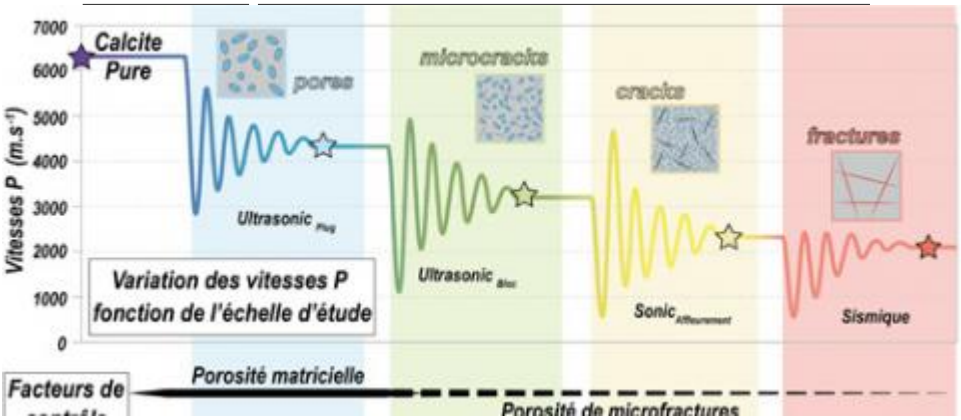


Recherche fondamentale

Actualités avril 2020

Des modélisations dynamiques pour aider à (vraiment) atteindre la neutralité carbone

Climat, environnement et économie circulaire | Surveillance environnementale | Analyse de cycle de vie (ACV)



Caractérisation et modélisation du couple faciès(a)-éogenèse(b), état initial des réservoirs carbonatés (HDR 2017)

Les réservoirs carbonatés présentent de fortes hétérogénéités (de types et d'échelles) liées à l'origine biologique des sédiments[c], mais également aux tr

Géosciences | Géologie - Sédimentologie | Géostatistique - Modélisation géologique | Pétrophysique et transferts en milieux poreux

Changement global, impact sur les paysages et la ressource en eau

La qualité de l'air est aujourd'hui un sujet de préoccupation majeur en matière de santé publique. Pour la préserver, il est nécessaire de réduire les émissions mais aussi de surveiller l'évolution chimique globale de l'atmosphère. Il importe en outre de suivre les gaz émis à l'échelle industrielle, ce qui répond également à des enjeux économiques et de sécurité.

C'est pour traiter ces différents aspects que les chercheurs d'IFPEN se sont lancés dans le développement d'un ensemble de solutions technologiques, rassemblées dans le projet Flair Suite.

L'objectif de l'équipe projet pluridisciplinaire était de développer des outils et des modèles permettant de géolocaliser, d'identifier, de quantifier et de comprendre toutes les sources d'émission de gaz à effet de serre et de polluants gazeux, d'origine naturelle ou industrielle. Axé initialement sur le monitoring du CO_2 dans le contexte du captage-stockage, le projet s'est ensuite orienté vers les industries du gaz naturel et du biogaz, de la pétrochimie et de la gestion des déchets.

Aujourd'hui, sont en cours de développement :

- Des stations de monitoring de gaz (fixes et mobiles) dédiées au suivi de la qualité de l'air, détectant les fuites de gaz sur les réseaux (Flair box™, Flair car™) et les fuites diffuses au niveau du sol (Flair soil™)[1].

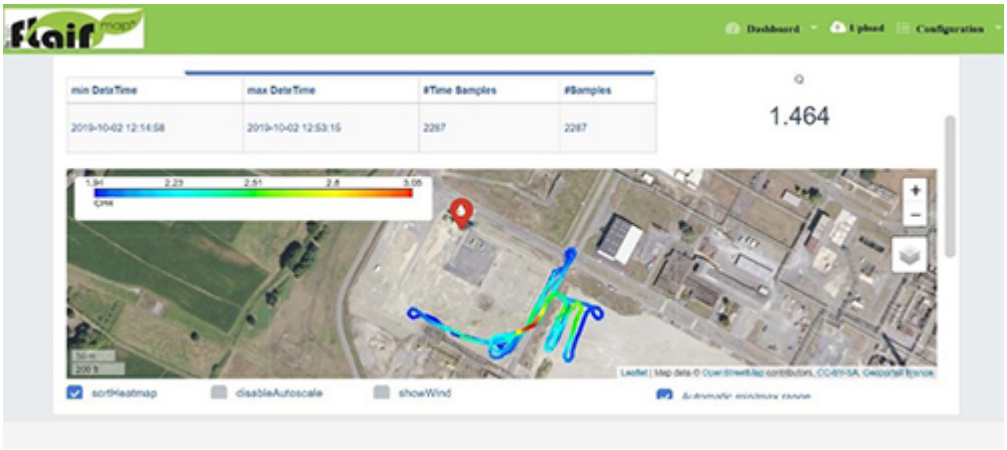






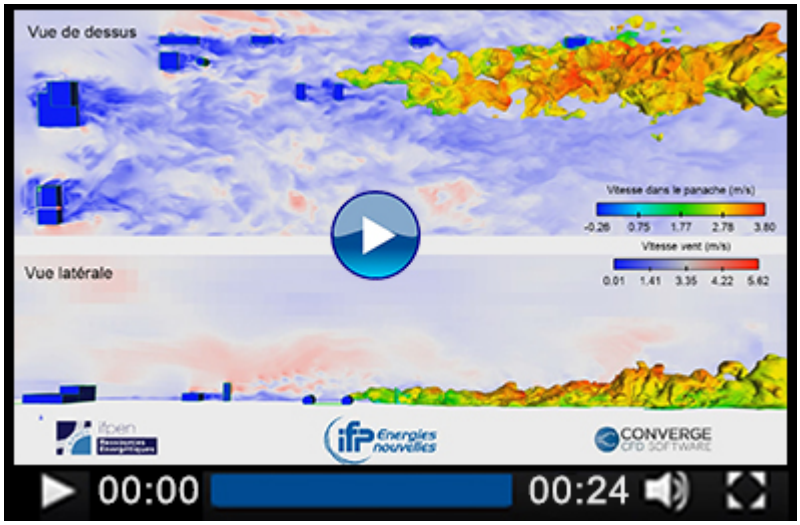
- Des logiciels et des algorithmes de cartographie des concentrations de gaz en temps réel (Flair map real time™), de calcul des points de fuite (*Smog Leak*) et de modélisation des panaches[2].

Cliquer sur l'image pour l'agrandir



Calcul du point de fuite de CH4 et simulation 3D du panache de CH4

Cliquer sur l'image pour lancer l'animation



Animation : vitesse dans le panache et vitesse vent

- Une application web (Flair map™), réalisée avec xDash, offrant une restitution à la fois précise et ludique des données[3].

Cliquer sur l'image pour l'agrandir

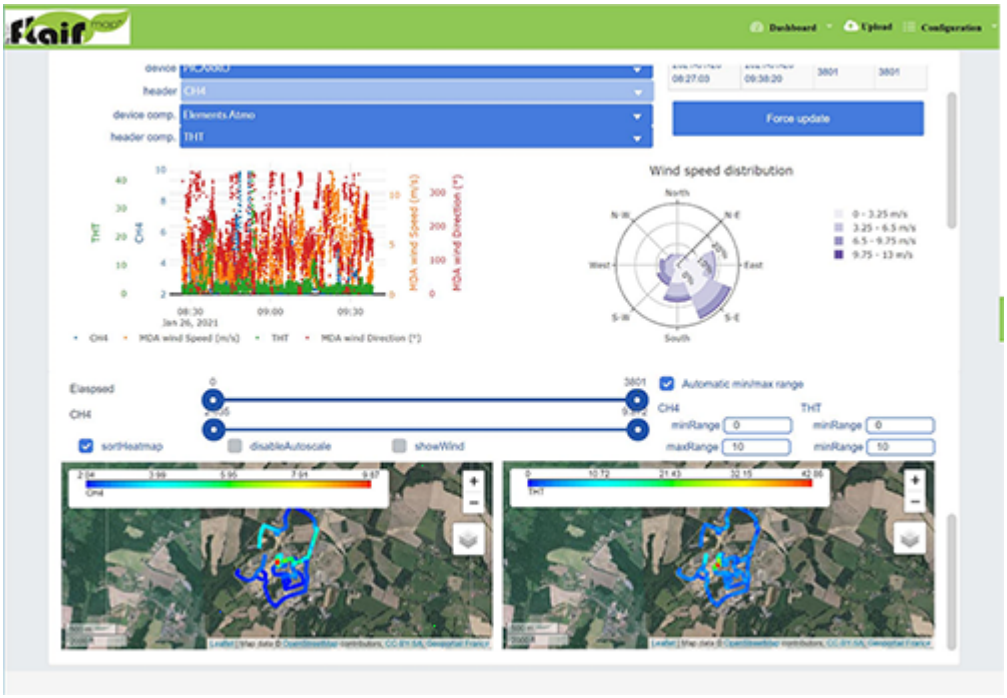


Tableau de bord Flair map™ réalisé avec xDash™

De nouveaux domaines d'application

Les stations de monitoring sont configurées pour détecter la moindre fuite de gaz au sol ou dans l'air ambiant. Afin de caractériser au mieux l'origine de ces fuites, le panel de molécules surveillées est constamment élargi. Ainsi, une vingtaine de molécules sont actuellement mesurables au niveau du ppb depuis nos stations de monitoring. Les émissions naturelles de gaz (gaz des sols et liés à la biomasse, à la géothermie, au pergélisol, etc.) sont également étudiées dans le projet Flair Suite, ce qui ouvre les champs d'application possibles.

La pollution olfactive constitue un autre axe d'intérêt prépondérant du projet. La Flair box™ est ainsi capable de mesurer dans l'atmosphère un cocktail de molécules odorantes à de très faibles teneurs (ppb) :

- molécules nauséabondes naturelles (ammoniaquées), que l'on retrouve par exemple dans le fumier ou le lisier ;
- molécules de synthèse, comme le tétrahydrothiophène (THT) ajouté dans le gaz naturel pour faciliter la détection d'une fuite ou comme les fragrances agréables pulvérisées en vue de masquer les émanations de certains sites industriels.

Utilisé en conditions réelles, le dispositif a permis de distinguer les contributions odorantes de deux sites industriels : un stockage de gaz naturel (odeur d'œuf pourri : le THT) et un stockage de déchets ménagers (odeur de chou fermenté : les thiols).

Evolution de Flair : du nez, des yeux et des oreilles

Les chercheurs travaillent aujourd'hui à enrichir Flair avec de nouvelles fonctionnalités sensorielles qui viendront compléter les stations de surveillance de gaz. Ainsi, le traitement des images issues des caméras embarquées sur les stations de monitoring (fixes et mobiles) viendra compléter les cartographies des concentrations de gaz : un algorithme permettra d'afficher en photo l'environnement à 360° lors d'une mesure anormale de gaz. De même, l'étude des fréquences sonores autour des stations de monitoring sera couplée au jeu de données atmosphériques, afin de caractériser les anomalies de gaz enregistrées (bruit de fuite, passage de véhicules, etc.).

Enfin, pour des raisons d'accessibilité des sites à étudier, les stations de monitoring doivent pouvoir être embarquées sur différents modes de locomotion : à pied, en voiture, en drone, à vélo... Aussi, un effort technologique est-il en cours afin de réduire la taille et le poids des stations.

Références :

[1] *Brevet : France (NP) - 23 avril 2020 - 20/04.067 « Système et procédé pour la surveillance de fuites de gaz au moyen d'une mesure optique ».*

[2] *Kumar P., Broquet G., Yver-Kwok C., Laurent O., Gichuki S., Caldow C., Cropley F., Lauvaux T., Ramonet M., Berthe G., Martin F., Duclaux O., Juery C., Bouchet C., Ciais P., Atmos. Meas. Tech. Discuss. [preprint], in review, 2020.* https://doi.org/10.5194/amt-2020-226.

[3] *Berthe G., Rouchon V., Ben Gaid M., El Feki A., Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B4-2020, 775–779, 2020.* https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-775-2020.

Contact scientifique : guillaume.berthe@ifpen.fr

>> NUMÉRO 46 DE SCIENCE@IFPEN

VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR

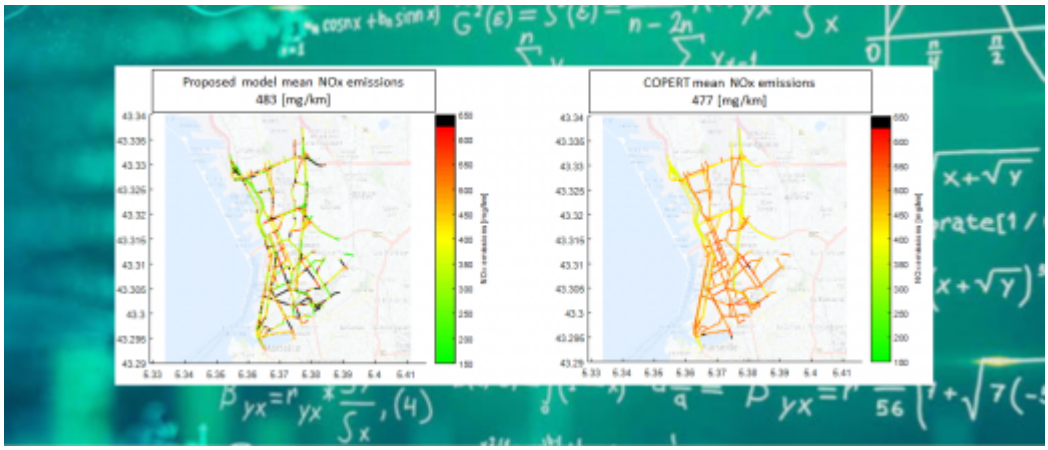


Innovation et industrie

Actualités mai 2021

Qualité de l'air : le baromètre de mobilité propre Geco air adapte ses trajets à la météo

Communiqués de presse



Recherche fondamentale

Actualités mars 2021

Les « Floating Car Data » au service de la qualité de l'air

Sciences de l'ingénieur **Technologie de la combustion et des moteurs**
Modélisation et simulation des systèmes **Mathématiques et informatique**
Méthodes numériques et optimisation

Flair Suite : au service de la surveillance environnementale et industrielle des gaz

Afin de répondre aux enjeux de la transition énergétique, le sous-sol a un rôle à jouer, à la fois pour fournir des ressources et pour offrir des solutions de stockage. Il est par exemple indispensable pour produire de la chaleur dans le cadre de forages géothermiques, récupérer des métaux rares, comme le lithium, présents sous forme dissoute dans certaines eaux souterraines, ou encore rechercher des conditions géologiques favorables à la formation d'hydrogène. Il suscite également l'intérêt dans le cadre des problématiques de stockage, transitoire ou permanent, dans la mesure où les importants volumes disponibles dans les milieux poreux souterrains peuvent permettre de stocker temporairement de l'énergie[a] ou, à plus long terme, de piéger le CO_2 capté sur des installations industrielles.

Les modèles numériques peuvent aider à mieux comprendre le sous-sol pour le gérer durablement et l'utiliser de manière optimale. Développés depuis de nombreuses années à IFPEN, initialement pour l'industrie pétrolière, de tels modèles couvrent des échelles qui s'étendent du bassin sédimentaire au réservoir :

- les modèles de bassin[b] sont destinés à la modélisation de l'environnement stratigraphique[c] (DionisosFlow™) ou à la modélisation de l'ensemble de l'histoire géologique du bassin considéré pour en déduire les propriétés et la localisation des fluides qu'il renferme (TemisFlow™) ;

- à des échelles moindres de temps et d'espace, les modèles de réservoir prédisent le comportement dynamique des fluides et des fractures présents dans le sous-sol (PumaFlow™, FracaFlow™, TightFlow™).

Ces outils forment également une excellente base pour répondre aux problématiques de production et de stockage d'énergie non fossile ou de gaz. Des travaux d'adaptation sont ainsi en cours à IFPEN pour apporter de nouvelles fonctionnalités aux modèles, en réponse à ces besoins émergents. On peut citer par exemple :

- la prise en compte avec TemisFlow™ du transfert de chaleur au travers de failles dans un bassin, pour mieux estimer et localiser son potentiel géothermique ;

- la modélisation des déplacements du CO_2 injecté dans le sous-sol, ainsi que les interactions géochimiques induites avec la roche, via le développement du logiciel CooresFlow™ basé sur des éléments de PumaFlow™.

Il est également apparu nécessaire d'intégrer plusieurs échelles et/ou plusieurs types de physique au sein d'un même modèle, comme cela se pratique déjà lors :

- de couplages entre outils « bassin » et « réservoir » afin d'identifier l'emplacement de zones potentielles de stockage de CO_2 dans des régions peu explorées ;

- de l'intégration des aspects géomécaniques de manière à mieux représenter les effets tectoniques et mécaniques dans le sous-sol.

Les risques associés à ces nouvelles utilisations du sous-sol peuvent être étudiés grâce aux approches, disponibles ou en cours de développement, dans le domaine de la quantification des incertitudes (CougarFlowTM).

Ces différents travaux font l'objet de nombreuses collaborations, au sein du projet Ademe Aquifer-CO_2Leak[1] ou du projet européen SENSE[2] par exemple. Dans le premier projet, l'utilisation de CooresFlowTM a été validée pour prédire l'écoulement de CO_2 dans le sous-sol, en comparant les résultats numériques aux données d'un site expérimental situé à Saint-Emilion. Dans le second, un couplage entre un modèle de réservoir et un modèle géomécanique a été mis en œuvre afin de monitorer les sites de stockage de CO_2 à partir de mesures satellites de déformation de surface.

D'autres projets collaboratifs, reposant sur la modélisation multi-échelle et multi-physique, sont en cours avec TotalEnergies. L'un d'eux étudie en particulier des approches combinant petites et grandes échelles afin de mieux prédire certaines propriétés du sous-sol lors d'un stockage de CO_2 (figure 1). Un autre vise à réaliser, pour la première fois dans un cadre industriel, le couplage entre un modèle de bassin et un modèle géomécanique[3] en vue de mieux prédire la fracturation naturelle des roches sédimentaires sous l'effet des contraintes tectoniques (figure 2).

Ces travaux illustrent l'évolution de la modélisation du sous-sol déployée par IFPEN en réponse aux enjeux technologiques de la transition énergétique, ainsi que la forte mobilisation de ses chercheurs pour progresser dans ce domaine.

Cliquer sur les images pour les agrandir

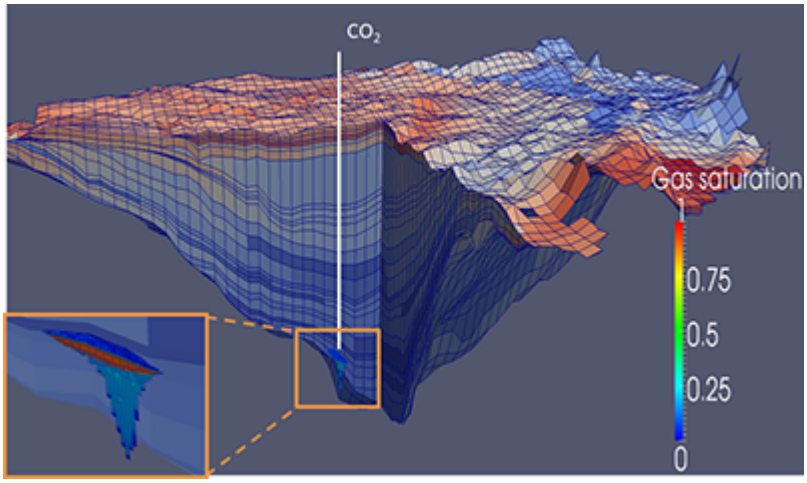


Figure 1 : Modélisation d'une injection de CO2 dans un bassin potentiel – couplage entre des outils de modélisation de bassin et de réservoir

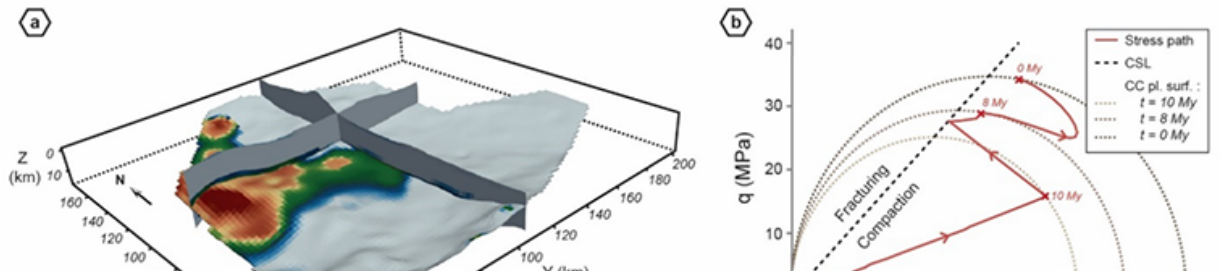


Figure 2 : Modélisation de la contrainte mécanique à l'échelle du bassin dans la formation Vaca-Muerta en Argentine. a) modèle couplé 3D et b) évolution des contraintes dans une cellule

a- Par exemple du gaz naturel, de l'air comprimé ou de l'hydrogène.
b- De l'ordre de 10 000 à 100 000 km^2.
c- Succession des différentes couches géologiques ou strates.

Références :

[1] *O. Gassara et al,* ***The Aquifer-CO_2Leak project: Numerical modeling for the design of a CO_2 injection experiment in the saturated zone of the Saint-Emilion (France) site****, International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021*. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103196.

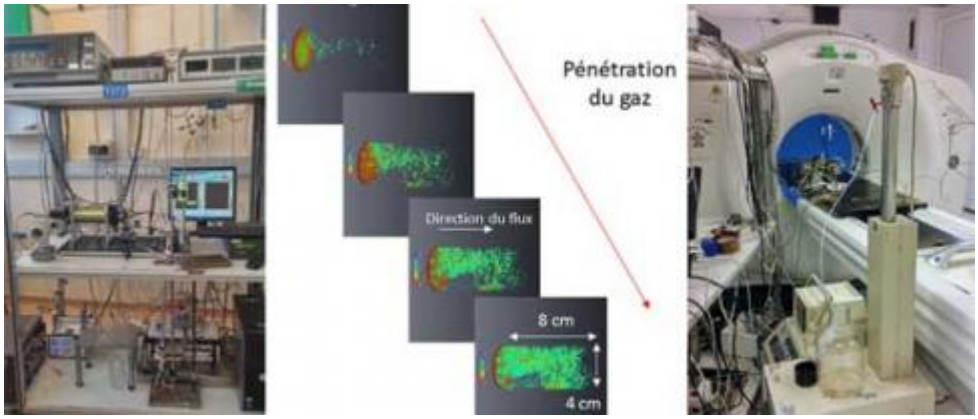
[2] *S. Bouquet et al.,* ***Analysis of surface movement through conceptual and coupled flow-geomechanics models, an example of surface monitoring assessment for CCS project, Trondheim Conference on CO_2 Capture, Transport and Storage****, 2021.*

[3] *J. Berthelon, A. Brüch, D. Colombo, J. Frey, R. Traby, A. Bouziat, M.C. Cacas-Stentz, T. Cornu,* ***Impact of tectonic shortening on fluid overpressure: Insights from the Neuquén basin, Argentina, Marine and Petroleum Geology****, Volume 127, 2021*. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104933.

Contact scientifique : nicolas.maurand@ifpen.fr

>> NUMÉRO 46 DE SCIENCE@IFPEN

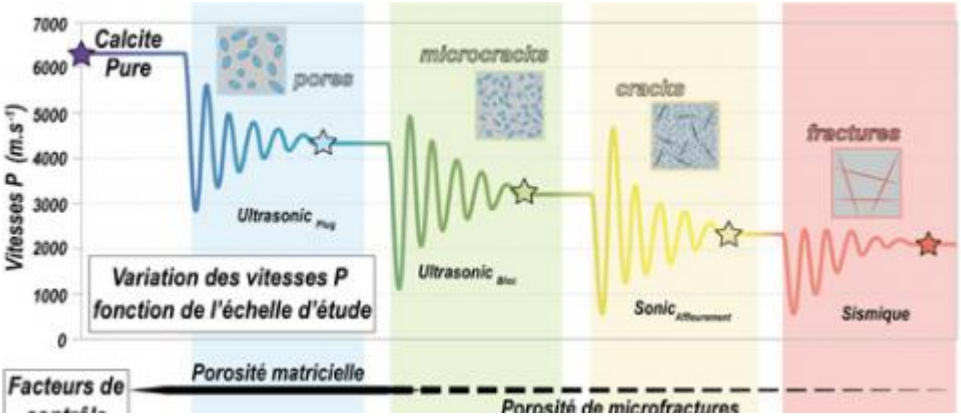
VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR



Un visiteur scientifique contribue à améliorer la surveillance des stockages de CO2

Depuis dix ans, IFPEN mène des actions de R&I sur la **surveillance géochimique du stockage géologique de CO_2**, afin de mieux appréhender les **flux hydriques nat**

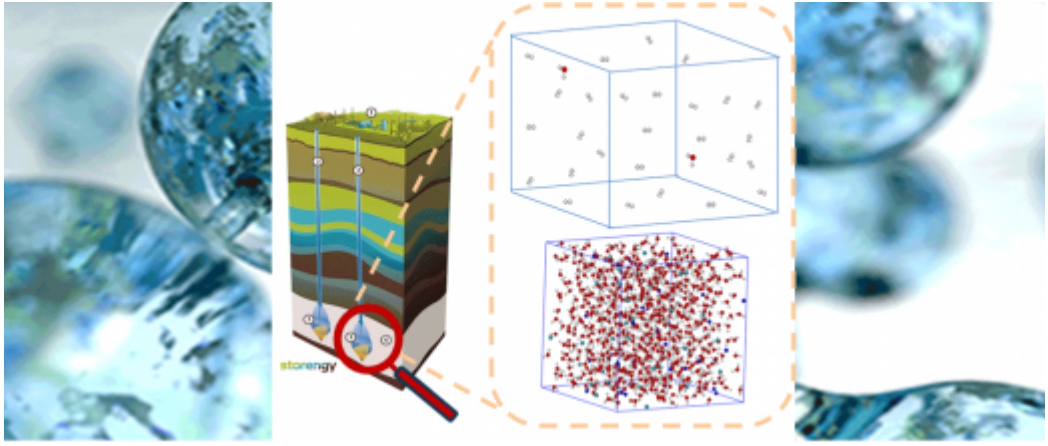
Géosciences **Géochimie** **Pétrophysique et transferts en milieux poreux**



Caractérisation et modélisation du couple faciès(a)-éogenèse(b), état initial des réservoirs carbonatés (HDR 2017)

Les réservoirs carbonatés présentent de fortes hétérogénéités (de types et d'échelles) liées à l'origine biologique des sédiments[c], mais également aux tr

Géosciences | Géologie - Sédimentologie | Géostatistique - Modélisation géologique | Pétrophysique et transferts en milieux poreux



Recherche fondamentale

Actualités février 2020

La simulation moléculaire au service du stockage géologique de l’hydrogène

Énergies renouvelables | Hydrogène | Stockage d'énergie

Sciences physiques | Thermodynamique / Modélisation moléculaire

La modélisation du sous-sol, étape essentielle pour la transition énergétique

La précipitation de sel dans des roches perméables est un risque auquel sont exposés certains secteurs de l'énergie, en particulier pour le stockage de gaz dans des formations géologiques lors des phases opérationnelles (injection et soutirage), lorsqu'il y a contact avec des aquifères salins. En effet, la circulation d'une phase gazeuse dans un milieu poreux partiellement saturé en saumure induit une cristallisation et une précipitation de sels au sein de l'espace poreux. Cette précipitation réduit l'espace permettant la circulation des fluides, ce qui entraîne l'altération de la perméabilité de la roche, voire son colmatage dans certaines conditions.

Afin de comprendre les mécanismes sous-jacents à ce phénomène d'endommagement, des expériences d'écoulement de gaz dans un milieu poreux préalablement saturé en saumure ont été réalisées sur le banc d'écoulement CAL-X d'IFPEN[1]. Ces expériences ont permis d'observer en 2D la dynamique de migration du sel, grâce à l'utilisation de la radiographie par rayons-X. Toutefois, l'utilisation des seuls rayons X ne suffit pas pour à la fois mesurer la saturation locale en eau et différencier les états dans lesquels se trouve le sel.

Pour pallier cette limitation, ces expériences ont été reproduites sur la ligne neutron D50T de l'Institut Laue-Langevin (proposition UGA-77)[2], dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire NeXT-Grenoble[3] et Equinor. Cette ligne dispose également d'une source de rayons-X, permettant ainsi de produire des observations simultanément par imagerie aux rayons-X et par imagerie aux neutrons. La complémentarité de ces deux méthodes permet donc de suivre localement la saturation en eau et la quantité de sel, à la fois dissoute et précipitée.

La figure 1 montre une série de radiographies de neutrons et de rayons-X acquises pendant une injection d'un gaz sec (N_2) dans une roche, au contact d'une saumure à 100 g/l de KBr dans sa partie basse. La radiographie neutronique montre clairement la présence d'eau à la base de l'échantillon, tandis que la radiographie aux rayons-X révèle la migration de sel.

La figure 2 illustre l'évolution dans le temps (a) et l'espace (b) de différentes grandeurs d'intérêt (quantité d'eau, de sel dissous et de sel précipité). Ces observations ont permis de montrer que la précipitation de sel résulte de l'interaction de différents paramètres, à savoir le gradient de pression, la concentration de la saumure, les forces capillaires et la pression partielle de la vapeur d'eau. De plus, l'injection de gaz sec fait précipiter systématiquement le sel mais l'altération de la perméabilité n'est observée que si un contact capillaire est maintenu avec la saumure.

Ce travail expérimental a permis de construire un modèle d'écoulement 2D intégrant les différents mécanismes physiques et physico-chimiques observés. Une fois calibré, le modèle a démontré une bonne prédictibilité de l'expérience à l'échelle du laboratoire. Ce modèle va pouvoir être utilisé dans le cadre d'une étude paramétrique et faire l'objet d'une mise à l'échelle par simulation au niveau du puits.

Cliquer sur les images pour les agrandir

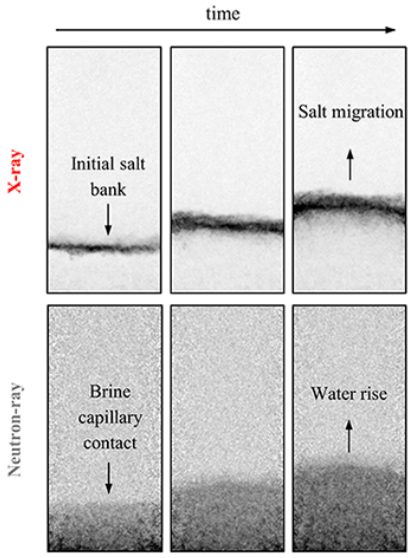


Figure 1 : Radiographies 2D pendant la précipitation de sel, prises à 100 min, 120 min et 140 min de gauche à droite.
Le gaz est injecté de haut en bas, le contact capillaire est maintenu en bas de l'échantillon

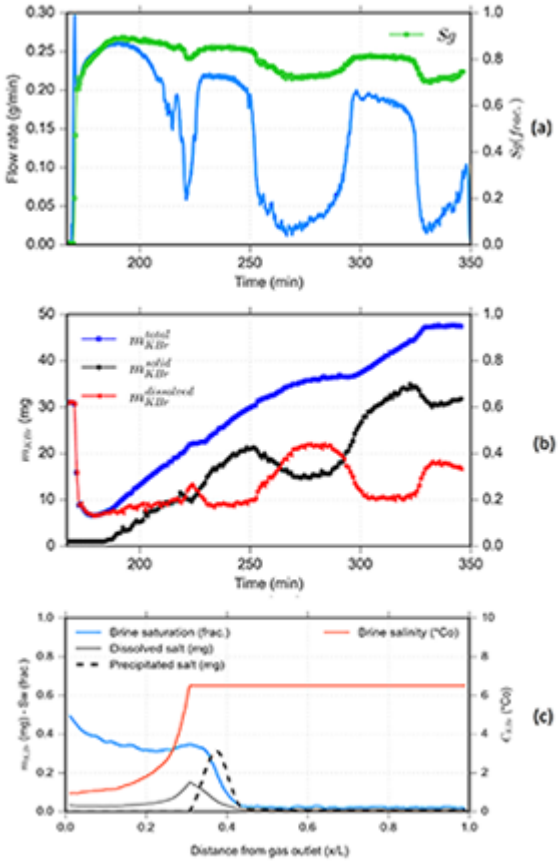


Figure 2 : Essai d'injection d'azote avec contact capillaire à la saumure de KBr à 100 g/l maintenu à la sortie. a) saturation et débit de gaz, b) évolution dans le temps de la quantité de sel et c) répartition du sel dans les différentes phases (t = 150 min)

Références :

[1] *O. Lopez, S. Youssef, A. Estublier, J. Alvestad et C. Weierholt Strandli. 3S Web Conf., 146 (2020) 03001.* https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014603001.

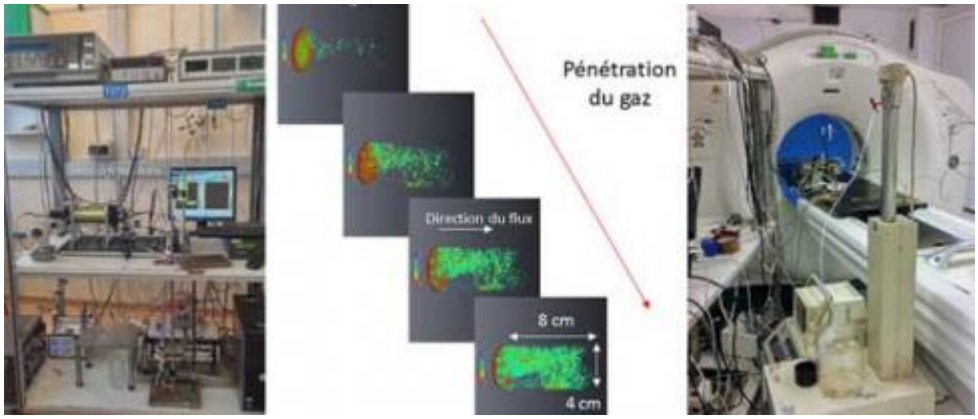
[2] *M. Mascle, O. Lopez, H. Deschamps, L. Rennan, N. Lenoir, A.Tengattini et S. Youssef. Int. Sym. of the Society of Core virtual, SCA 2021-06.*

[3] *A. Tengattini, N. Lenoir, E. Andò, B. Giroud, D. Atkins, J. Beaucour et G. Viggiani. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section. Volume 968, 2020*. https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163939.

Contact scientifique : souhail.youssef@ifpen.fr

>> NUMÉRO 46 DE SCIENCE@IFPEN

VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR



Un visiteur scientifique contribue à améliorer la surveillance des stockages de CO2

Depuis dix ans, IFPEN mène des actions de R&I sur la **surveillance géochimique du stockage géologique de CO_2**, afin de mieux appréhender les **flux hydriques nat**

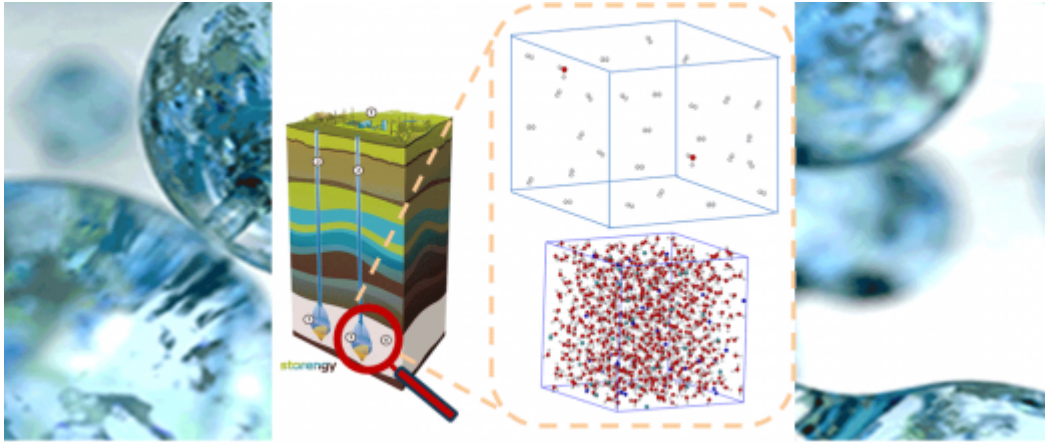
Géosciences **Géochimie** **Pétrophysique et transferts en milieux poreux**



Interactions entre les minéraux argileux et les tensioactifs anioniques

THÈSE DE ARIANE SUZZONI

Sciences physiques | Rhéologie et comportement des matériaux | Chimie physique
Fluides complexes, colloïdes et matière condensée
Science des surfaces, des interfaces et des matériaux



Recherche fondamentale

Actualités février 2020

La simulation moléculaire au service du stockage géologique de l’hydrogène

Énergies renouvelables | Hydrogène | Stockage d'énergie

Sciences physiques | Thermodynamique / Modélisation moléculaire

Rayons-X et neutrons pour des images qui ne manquent pas de sel

Apparues dans les années 1990, les notions de géopatrimoine et de géodiversité reçoivent une attention grandissante de la part des communautés académiques, des organisations internationales et des pouvoirs publics. Le concept de géopatrimoine inclut notamment l'idée que certains sites géologiques sont de précieuses fenêtres ouvertes sur les événements naturels passés et sur le fonctionnement de la planète, et qu'ils nécessitent à ce titre des actions de protection et de valorisation similaires à celles mises en œuvre pour le patrimoine historique. Le concept de géodiversité se fonde quant à lui sur un parallèle entre la variété des objets géologiques et celle des êtres vivants, proposant ainsi des actions de recensement et de conservation comparables à celles utilisées pour la biodiversité.

C'est dans ce contexte qu'IFPEN a signé en 2020 un accord de partenariat avec l'UNESCO, dont l'un des objectifs est le partage d'outils numériques facilitant la promotion du géopatrimoine et de la géodiversité auprès du grand public[1]. Ces outils sont construits en synergie avec des actions de R&D réalisées pour l'industrie, en revisitant les technologies sous-jacentes dans une approche tournée vers la société.

Un premier exemple est l'utilisation de la réalité virtuelle pour proposer des visites d'affleurements géologiques[a]. Ce travail s'appuie sur la méthodologie DOM (*Digital Outcrop Models*) : à partir d'un ensemble de photos acquises suivant les principes de la photogrammétrie[b], il est possible de produire une représentation géométrique virtuelle en 3D d'un affleurement, avec sa texture et ses couleurs originales. Initialement développés pour les besoins de l'industrie pétrolière[2] et de plus en plus utilisés pour l'enseignement des « Sciences de la Terre », les DOM favorisent également le partage « tout public » des connaissances liées au géopatrimoine, et permettent de découvrir des sites même sans s'y déplacer.

L'accessibilité croissante des technologies immersives a été mise à profit par des chercheurs d'IFPEN en 2020, dans le cadre d'une collaboration avec une PME. Il en a résulté un démonstrateur intégrant un modèle DOM dans un environnement virtuel immersif, consacré à la formation des grès d'Annot, un site de référence pour la compréhension des systèmes sédimentaires sous-marins profonds (figure 1). Ainsi, un utilisateur non-expert peut découvrir de manière interactive l'interprétation géologique de l'affleurement et accéder à un contenu pédagogique (textes, photos, vidéos) directement intégré dans la visualisation du site naturel.

Un deuxième exemple est l'utilisation de l'intelligence artificielle pour sensibiliser le grand public à la géodiversité. Des chercheurs d'IFPEN ont entraîné un modèle d'apprentissage profond à reconnaître différents types de roches à partir de photos d'échantillons. Ce modèle a ensuite été intégré dans une application mobile permettant à un utilisateur non-expert, à partir de photographies de roches qui l'entourent, d'obtenir des informations sur leur nature, leurs caractéristiques et leurs différents usages (figure 2). Actuellement au stade du prototype, cette application nommée RockNet™ vise à promouvoir une démarche de type « sciences participatives ». Les photos prises par tous les utilisateurs viennent en effet enrichir un atlas commun et une base de données permettant d'améliorer progressivement la précision et la qualité des résultats fournis[3].

Ces deux exemples illustrent l'apport possible du numérique pour promouvoir les connaissances géologiques auprès du grand public[4], un enjeu important pour rendre les citoyens de plus en plus acteurs des débats sur la protection de l'environnement, l'exploitation raisonnée des ressources souterraines et l'évolution de la planète.

Cliquer sur les images pour les agrandir

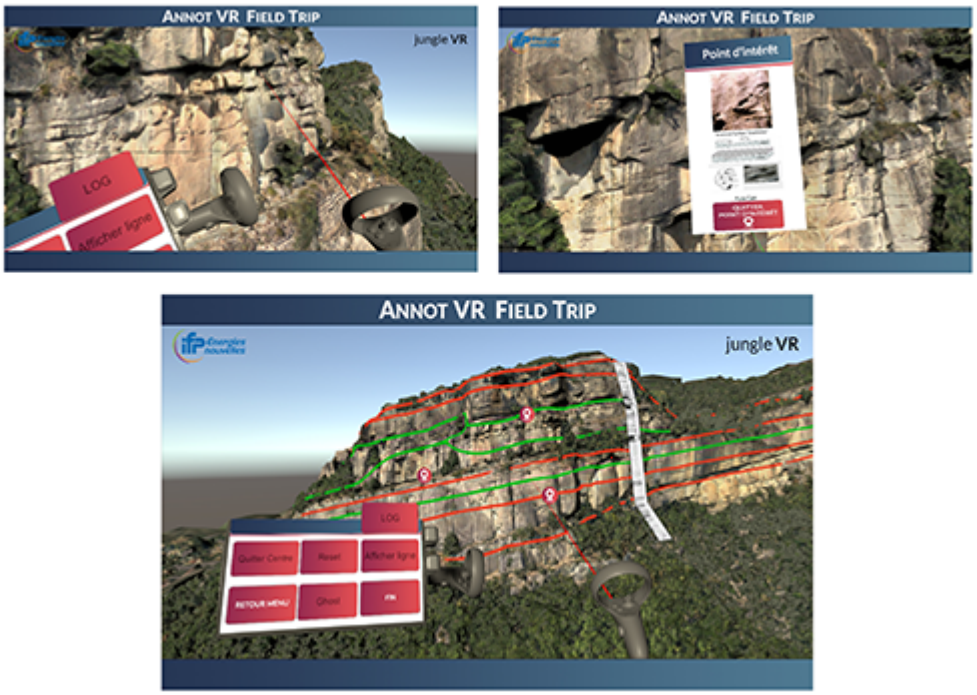


Figure 1 : Aperçu de l'intégration de l'affleurement des grès d'Annot dans un environnement virtuel et immersif

En plus de la visualisation de l'affleurement selon différents points de vue et niveaux de zoom, l'utilisateur peut interagir avec des données géologiques et du contenu pédagogique complémentaires (interprétations stratigraphiques, logs sédimentaires, photos d'échantillons, textes et vidéos, etc.).
>> Plus d'images de la technologie dans le **clip vidéo** suivant : https://www.youtube.com/watch?v=QOPX0wvwUE0.

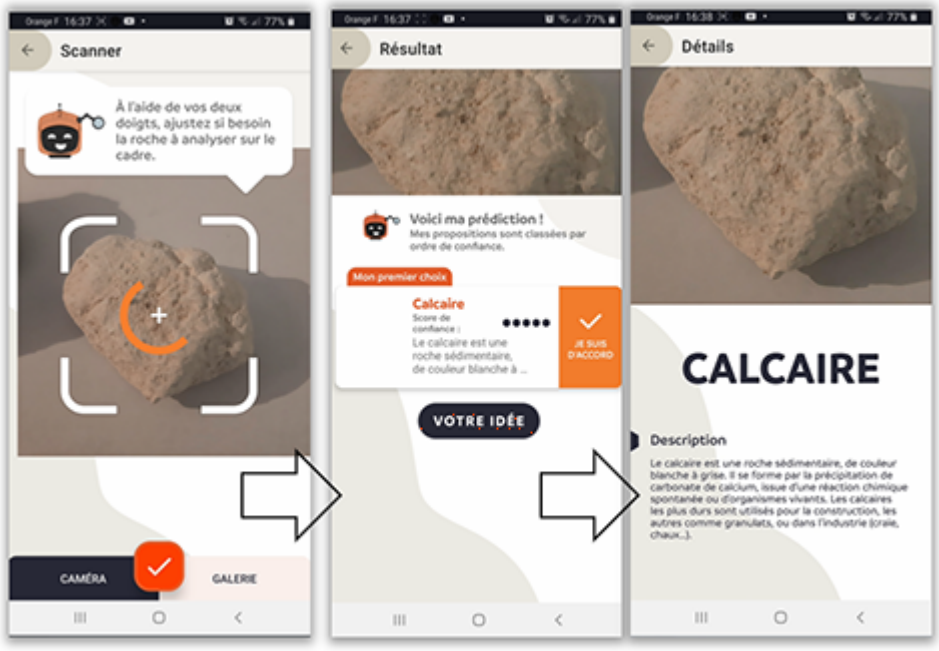


Figure 2 : Aperçu de l'interface et du fonctionnement de l'application RockNet®

A partir d'une photo prise par l'utilisateur avec son smartphone, le modèle d'intelligence artificielle propose une identification du type de roche correspondant et fournit un premier niveau d'informations grand public. Plus de détails sur RockNet® : www.rocknet.fr

a- Ensembles rocheux, souvent longs de plusieurs dizaines de mètres, mis à nu et directement visibles à la surface de la Terre. Ils sont précieux pour les géologues car ils donnent un aperçu direct de la constitution du sous-sol.
b- Technique permettant de reconstituer une scène en 3D à partir d'images acquises selon différents points et angles de vue.

Références :

[1] *Communiqué « IFP Energies nouvelles et l'UNESCO s'associent dans le domaine des géosciences pour une gestion durable des ressources dans le cadre de la transition énergétique », 6 octobre 2020.*

[2] *Deschamps R., Joseph P., Lerat O., Schmitz J., Doligez B. et Jardin A. (2015). AAPG Search and Discovery, Art. no 41696.* http://www.searchanddiscovery.com/documents/2015/41696deschamps/ndx_deschamps.pdf.

[3] *Bouziat A., Desroziers S., Feraille M., Lecomte J.-C., Cornet C., Cokelaer F. et Divies R. (2021). EGU General Assembly 2021, online, 19–30 avril 2021, EGU21-13068.* https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13068.

[4] *Bouziat A., Schmitz J., Deschamps R. et Labat K. (2020). European Geologist, 50.* http://doi.org/10.5281/zenodo.4311379.

Contact scientifique : antoine.bouziat@ifpen.fr

>> NUMÉRO 46 DE SCIENCE@IFPEN

VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR



Recherche fondamentale

Actualités octobre 2020

IFPEN et l’UNESCO s’associent dans le domaine des géosciences

Communiqués de presse

Énergies renouvelables



Interprétation d’images géologiques assistée par Intelligence Artificielle

Au cours de la dernière décennie, l’apprentissage profond (deep learning) appliqué à l’analyse d’images a connu un réel essor et une extension dans de nombreux domaines. Cependant, son potentiel reste encore sous-exploité en géologie, bien que cette discipline implique beaucoup d’interprétation visuelle. Pour contribuer à la transformation numérique des industries liées au sous-sol, les chercheurs IFPEN ont mis en œuvre l'apprentissage profond dans trois « contextes métier », impliquant chacun un type différent d’images géologiques.

Géosciences | Géologie - Sédimentologie | Mathématiques et informatique | Traitement du signal / Science des données



IFPEN

Événements 01 - 11 octobre 2021

Fête de la Science 2021 - Retrouvez nos chercheurs en replay !

Géopatrimoine et géodiversité accessibles à tous grâce au numérique

Le transport de particules colloïdales dans des milieux poreux concerne de nombreux domaines, dont les géosciences et l'ingénierie environnementale. Or les interactions particule-matrice peuvent produire la formation et l'accumulation de dépôts, avec à la clé un risque d'endommagement du milieu et d'altération de sa perméabilité.

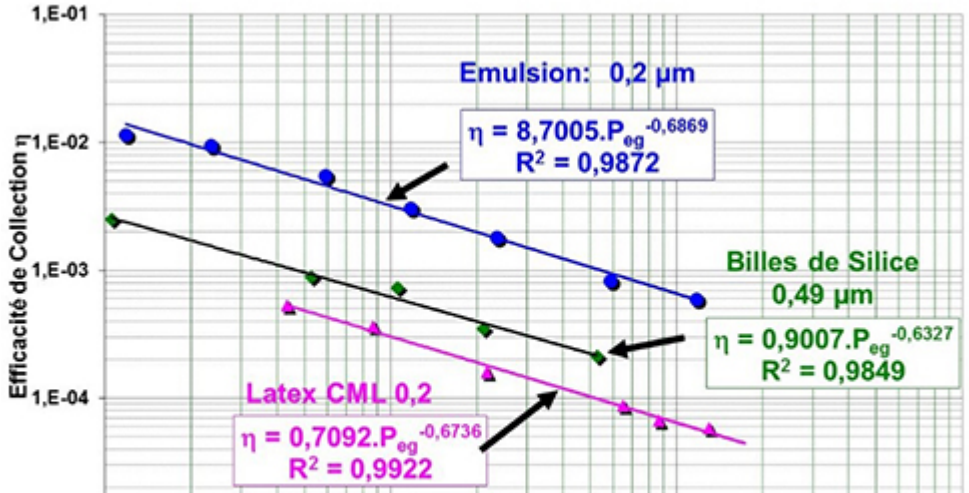
Ce phénomène est particulièrement fréquent dans les nombreux systèmes naturels et industriels où la matière est présente à l'échelle finement divisée : c'est notamment le cas dans les domaines de la production pétrolière (particules solides, émulsions, asphaltène, etc.), de la géothermie et de la dépollution des eaux et des sols. Ainsi, lors d'opérations de production et de réinjection de fluides par exemple, des particules fines (endogènes ou/et exogènes) peuvent colmater les pores dans la colonne du puits sous l'effet d'importants changements physico-chimiques et hydrodynamiques, réduisant très fortement l'injectivité et la productivité, au point parfois de devoir condamner des puits. Contrôler ces phénomènes en milieu poreux représente donc un enjeu majeur pour les industries concernées.

A IFPEN, le problème a été étudié à l'origine pour la production des hydrocarbures et concerne aujourd'hui d'autres contextes applicatifs : la géothermie et le stockage géologique du CO_2. Pour comprendre et caractériser expérimentalement ces phénomènes de dépôt/colmatage et leurs conséquences sur les propriétés pétrophysiques des milieux, des moyens dédiés ont été développés :

- des dispositifs corefloods[a] équipés de prises de pressions intermédiaires permettant une caractérisation des dépôts formés à l'échelle du Darcy[b] ;
- un système haute pression de filtration sur membrane équipé d'une caméra pour suivre l'évolution de l'épaisseur du cake (accumulation des particules à l'entrée du milieu)[c] ;
- des micro-modèles[d] permettant l'observation directe des phénomènes d'écoulement à l'échelle du pore, ainsi que la caractérisation des dépôts et des mécanismes impliqués à cette échelle.

Leur mise en œuvre dans de nombreux projets de recherche a permis d'identifier et de caractériser les différents régimes et cinétiques de dépôt en milieu poreux, et d'en proposer une modélisation physique, à la fois générique et originale. Celle-ci prend la forme de lois d'échelle, de type loi de puissance du nombre de Peclet $(P_{eg})^e$, avec un exposant universel égal à -2/3 et un pré-facteur qui dépend de la nature de la particule, ainsi que l'illustre la figure pour trois types de colloïdes.

Cliquer sur l'image pour l'agrandir



Cinétique de dépôt pour différents types de particules

Une approche pragmatique a ensuite été proposée pour la modélisation des pertes d'injectivité. Celle-ci se fonde, d'une part, sur la modélisation physique décrite ci-dessus concernant l'endommagement interne (formation de dépôts) et, d'autre part, sur des corrélations empiriques pour l'endommagement externe (cake externe de filtration). Ces modèles ont ainsi été récemment intégrés dans un outil de simulation de transport réactif[f] [3], utilisé entre autres pour modéliser l'injection de CO_2 dans le sous-sol lors d'opérations de séquestration.

Ce travail illustre une nouvelle fois la capacité d'IFPEN à mettre ses expérimentations, ses modèles et ses compétences multidisciplinaires au service de domaines à fort enjeu pour la transition écologique [4].

a- Expérience d'injection de fluide dans une carotte de roche.
b- 1 Darcy = $0{,}97.10^{-12}$ m^2.
c- Associée à la mesure de la perte de charge, cette information permet de caractériser le cake externe (en perméabilité, k_c, et en densité, $?_c$) et le rapport de qualité de l'eau, ? (? = $C_{particules}$/ $k_c.?_c$) avec C la concentration.
d- Puce en verre dans laquelle est gravé un réseau poreux 2D.
e- Nombre comparant les forces convectives aux forces diffusives (Pe = v.Lc/D, avec v la vitesse du fluide, Lc la dimension caractéristique du système et D le coefficient de diffusion des particules.
f- Simulateur CooresFlow™.

Références :

[1] *D. Rousseau, L. Hadi et L. Nabzar, SPE Production & Operation, novembre 2008, 525-532.*

[2] *S. Buret, L. Nabzar et A. Jada, SPE Journal, 15(2), juin 2010, 557-568. SPE-122060-PA*. https://doi.org/10.2118/122060-PA.

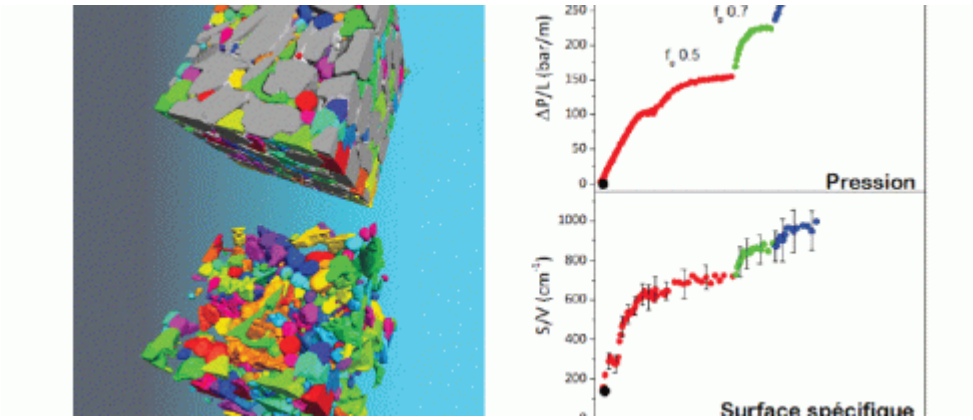
[3] *Petrobras-IFPEN R&D collaborative project on Reactive transport simulation – CooresFlow™ Phase 2, 2020-2021.*

[4] *Collaboration avec Geofluid : « Problématique de l'injection en milieu poreux non consolidés. Processus d'endommagements et remédiations. Mesures sur sites (l'Albien) et essais en laboratoire », projet Ademe sur la géothermie, 2020-2022.*

Contacts scientifiques : jalila.boujlel@ifpen.fr et lahcen.nabzar@ifpen.fr

>> NUMÉRO 46 DE SCIENCE@IFPEN

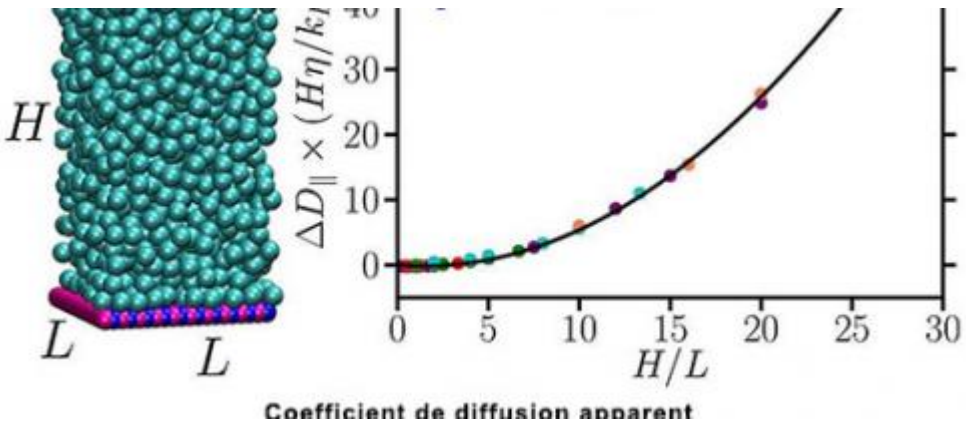
VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR



Étude in situ de la structure fine d’une mousse en écoulement dans un milieu poreux réel

L’injection de mousse en production pétrolière ou en dépollution des sols vise à remédier aux problèmes de ségrégation gravitaire et de digitation visqueuse[a]

Géosciences | Pétrophysique et transferts en milieux poreux | Analyse et caractérisation | Analyse structurale et imagerie

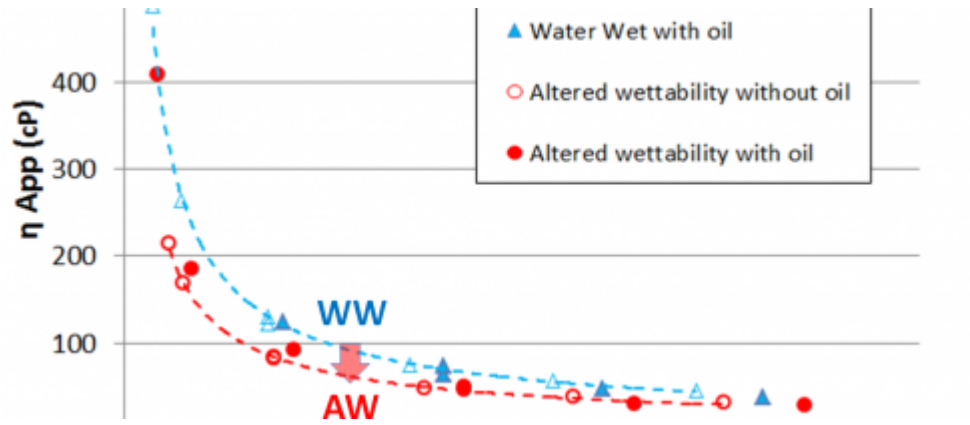


Coefficient de diffusion apparent

Mieux simuler les processus de transport dans des nanopores grâce à la dynamique moléculaire

THÈSE DE PAULINE SIMONNIN

Géosciences | Pétrophysique et transferts en milieux poreux | Sciences physiques | Thermodynamique / Modélisation moléculaire | Mathématiques et informatique | Méthodes numériques et optimisation



Rhéologie de la mousse en milieu poreux

Pour les procédés impliquant l'injection de gaz, tels que la récupération assistée des hydrocarbures (EOR[a]) ou bien les opérations de stockage de C

Géosciences | Pétrophysique et transferts en milieux poreux | Sciences physiques | Rhéologie et comportement des matériaux | Chimie physique | Fluides complexes, colloïdes et matière condensée

Transport de colloïdes en milieu poreux : dépôts et colmatage

Numéro 46 de Science@ifpen - Sciences de la Terre et Technologies de l’Environnement
17 novembre 2021

Lien vers la page web :