



# DEEPSURF

## Rapport d'activité

### ANNÉE 2021

Photo : Jacques Pironon

Site web : [www.univ-lorraine.fr/lue/les-projets-impact/deepsurf](http://www.univ-lorraine.fr/lue/les-projets-impact/deepsurf)

E-mail : [deepsurf-contact@univ-lorraine.fr](mailto:deepsurf-contact@univ-lorraine.fr)

Twitter : [IMPACT\\_Deepsurf](https://twitter.com/IMPACT_Deepsurf)



**IMPACT**  
**DEEPSURF**



**UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE**



1	Le projet
Axe 2 - Nouvelles approches pour la transition énergétique	
2	
3	Axe 3 - Interactions profond - surface
Axe 4 - Incertitudes, évaluation des risques et intégration territoriale	
4	
5	Faits marquants de l'année

# Sommaire

---

# ÉDITORIAL

---

## L'ADN de DEEPSURF...

L'année 2021 a vu s'éterniser la crise COVID et malgré cela, le projet DEEPSURF a su profiter de quelques fenêtres favorables pour maintenir un haut niveau de collaborations interdisciplinaires et s'ouvrir à la communauté internationale à l'occasion notamment de la première conférence DEEPSURF 2021.

Cette première ouverture vers nos collègues étrangers a fait ressortir l'initiative DEEPSURF comme unique et essentielle dans le paysage européen, brisant les rigidités disciplinaires, universitaires et politiques. Enfin un lieu d'échange où chacun interroge l'autre sans tabous ni inhibitions, où les spécialistes s'enrichissent du regard de l'autre quel que soit son domaine de compétence. La possibilité de partager une journée d'excursion dans la région Lorraine a permis convivialité et prise en compte de l'ancrage territorial des recherches présentées par les jeunes chercheurs. Unaniment, les participants ont plébiscité une Conférence DEEPSURF #2. Réservez d'ores et déjà la semaine du 17 au 21 octobre 2022 !

En écho aux objectifs de réduction des émissions de GES de 40 % d'ici 2030 et de neutralité carbone d'ici 2050 de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), DEEPSURF s'inscrit dans le cadre de plusieurs Programmes Prioritaires de Recherche et d'Équipement (PEPR). Dans le cadre du PEPR « Décarbonation de l'industrie » doté de 70 M€, DEEPSURF prendra sa place notamment sur les approches bilans carbone, monitoring et surveillance. Naturellement, DEEPSURF s'associera au PEPR exploratoire FairCarboN qui s'intéresse quant à lui au cycle du carbone, afin d'identifier des leviers – écologiques, agronomiques et socio-économiques – et scénarios de trajectoires pour atteindre la neutralité carbone et restaurer les ressources naturelles dans les écosystèmes continentaux. DEEPSURF a aussi vocation à collaborer au programme PEPR exploratoire OneWater, centré sur l'eau comme « bien commun » dans le cadre d'une nouvelle gouvernance des ressources pour une société durable et résiliente.

À l'échelle locale, 2021 a été marquée par le comité de suivi à mi-parcours du projet DEEPSURF qui a permis de mettre en perspective les réalisations et la cohérence du projet. Ainsi, le comité a pu conclure que « le fort niveau d'intégration de disciplines très variées, mais aussi de niveaux de TRL différents, est remarquable ; on peut dire que cette dimension intégratrice représente l'ADN de

DEEPSURF et lui donne une vocation à servir de référence en France et en Europe ».

C'est donc tout naturellement que le Comité Scientifique de DEEPSURF a unanimement soutenu une candidature à l'appel à Manifestation d'Intérêt de Lorraine Université d'Excellence. Ainsi, le projet DEEPSURF-Horizon 2025 a été déposé. Il s'inscrit dans la continuité et a pour ambition de devenir un moteur incontournable de la science durable en France à travers une démarche systémique disruptive à l'interface des transitions énergétiques, écologiques et sociétales face au changement climatique. DEEPSURF-Horizon 2025 offre aux laboratoires et aux partenaires un terrain de jeu gigantesque incluant la géosphère, l'hydrosphère, la troposphère, la biosphère (incluant la pédosphère et les technosols), et la technosphère qui regroupe tous les éléments qui sont apparus progressivement au cours de l'anthropocène et qui doivent nous interroger sur le recyclage, l'IA, les nouvelles technologies, la ville, l'économie, l'intégration territoriale, la communication, l'éducation, la santé et le bien-être des populations...

Si l'année 2022 devait marquer l'apothéose du programme DEEPSURF, avec notamment le feu d'artifice des soutenances de thèses, elle marquera sans doute un nouveau départ et de nouvelles ambitions. C'est normal, c'est dans l'ADN de DEEPSURF !



Jacques Pironon  
Porteur du projet IMPACT DEEPSURF

Photo : Jacques Pironon

# Le projet

Le projet DEEPSURF a pour but d'étudier et de mieux comprendre les échanges de chaleur, d'eau, d'hydrocarbures, de composés dissous et gazeux entre les différents compartiments que sont le sous-sol, le proche sous-sol, le sol, la biosphère et l'atmosphère. De plus, l'impact des risques sur l'écosystème et la perception de la société vis-à-vis de l'exploitation des ressources doivent être mieux compris et sont partie intégrante de DEEPSURF. L'ambition du projet est de combiner, d'une part la surveillance de la géosphère, de la biosphère et de l'atmosphère, et d'autre part la modélisation des incertitudes et des risques associés à l'utilisation du sous-sol, du sol et de la biosphère, en incluant en particulier les mécanismes de compensation et de remédiation.

Le projet DEEPSURF s'intéresse donc aux implications de la biosphère, du sol et du sous-sol dans les transitions énergétique et écologique. Cela englobe par exemple l'utilisation de biomasse à des fins énergétiques, le stockage géologique de gaz, d'énergie ou de déchets nucléaires, mais encore l'exploitation de ressources fossiles à faible empreinte carbone.

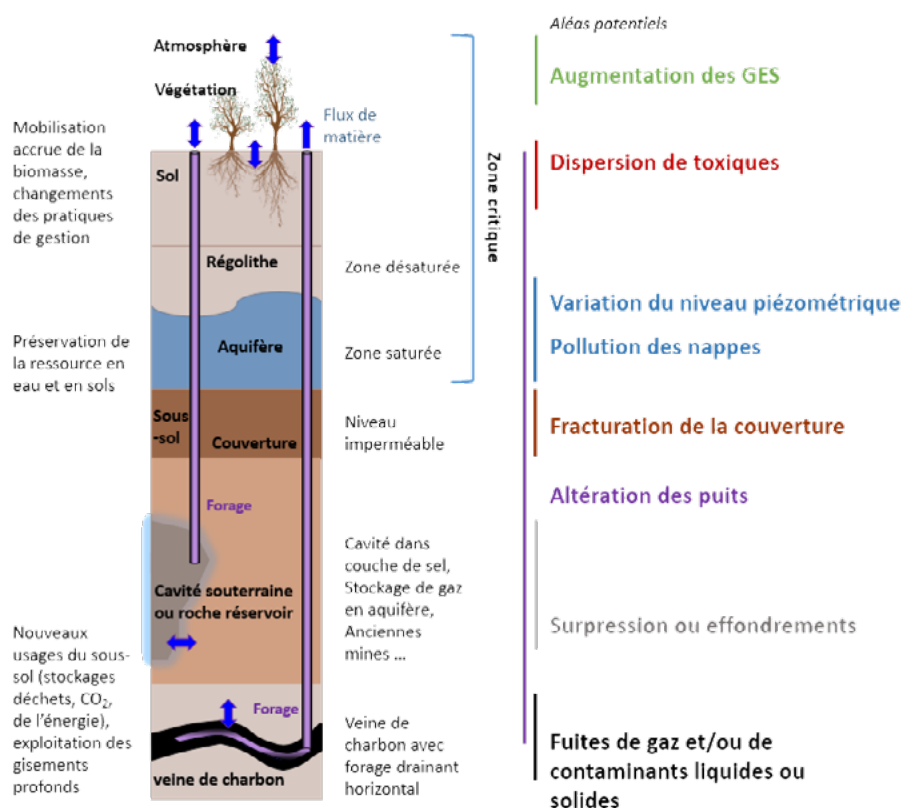
DEEPSURF est un projet de recherche pluridisciplinaire et interdisciplinaire qui regroupe des acteurs académiques et industriels dans les domaines des géosciences, des sciences du sol, des sciences forestières, de la biologie, des mathématiques, de l'économie, de la géographie, de l'histoire, de la psychologie sociale et du droit public.

L'essence même du projet DEEPSURF est d'allier des recherches appliquées sur de nouvelles solutions pour la transition énergétique et l'atténuation du changement climatique (optimisation de la production de biomasse énergétique sur des friches industrielles, potentiel des sols et forêts comme puits de gaz à effet de serre, évaluation des modalités hydrogéomécaniques et des risques du stockage géologique, etc.) avec des études sur la gestion durable des ressources naturelles (forêt, sous-sol, sol, ressources géologiques, etc.) et les services écosystémiques. De plus, par le développement de nouvelles technologies de capteurs biogéochimiques, le projet s'insère dans la chaîne de valeur des matériaux. Mais ces transitions technologiques n'ont pas d'avenir si elles sont déconnectées des territoires, c'est pourquoi DEEPSURF s'est engagé à accompagner, comprendre, et relativiser les transitions sociétales en fonction des contextes géographiques, historiques et

socio-économiques. La transcription des transitions dans le droit public ou privé, national ou européen est une condition sine qua non.

Le projet DEEPSURF, piloté par GeoRessources, mobilise 11 laboratoires lorrains dans des domaines scientifiques divers ainsi que de nombreux partenaires académiques et industriels, publics et privés qui sont des acteurs territoriaux importants. La dynamique DEEPSURF conduit à poursuivre des co-financements de projets par les partenaires ce qui participe largement à l'effet levier recherché. Trois axes du programme sont dédiés aux activités de recherche :

- Nouvelles approches pour la transition énergétique (biomasse énergétique, ressources souterraines à faible empreinte carbone, stockage géologique)
- Interactions profond – surface (nouveaux outils de monitoring et de surveillance, acquisition et gestion de bases de données, modélisation et approches mathématiques, démonstrateurs)
- Risques et intégration territoriale (risques accidentels et chroniques, trajectoire socio-économique et historique des territoires, aspects juridiques, psychologie des populations)



*Colonne d'observation de DEEPSURF : sous-sol, sol, végétation, atmosphère, avec les aléas potentiels à droite. Elle montre la vulnérabilité des systèmes naturels qui nécessite de mettre en place des stratégies de résistance ou de résilience pour faire face aux aléas.*

# COMITÉ DE SUIVI

Un comité de suivi du projet a eu lieu le 17 février 2021. Il a fait l'objet d'une réunion regroupant des membres du COMEX LUE, les porteurs du projet et des experts extérieurs : Jordi Bruno, géochimiste, spécialiste des stockages souterrains chez AMPHOS21, Florence Delprat-Jannaud, responsable de programmes à l'IFP Énergies Nouvelles, présidente du Club CO<sub>2</sub>, présidente du CS de DEEPSURF et Frédéric Plas, directeur de la R&D de l'ANDRA.

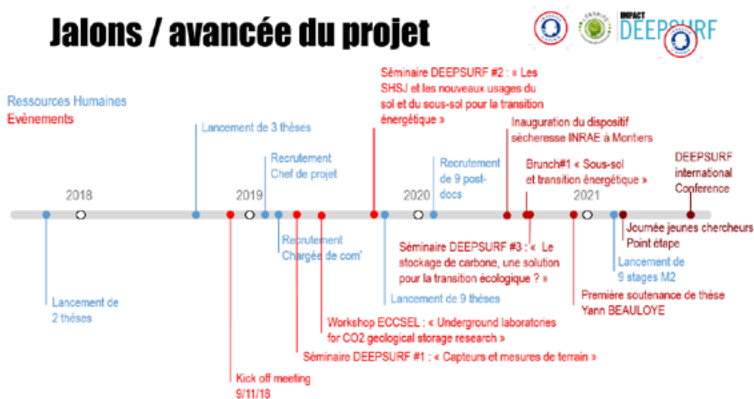
Les porteurs ont rappelé les points forts du projet et ont décrit les jalons et objectifs atteints en comparaison du prédictif.

DEEPSURF	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Objectifs vs. réalisation
WP1 - Management	Recruitments of Project Mgr. Organization of one Meeting of the Sc. Com. and 4 meetings of the Ex. Com. and WP meetings	Organization of one Meeting of the Sc. Com. and 4 meetings of the Ex. Com. and WP meetings	Organization of one Meeting of the Sc. Com. and 4 meetings of the Ex. Com. and WP meetings	Organization of one Meeting of the Sc. Com. and 4 meetings of the Ex. Com. and WP meetings	2 comités scientifiques/an 5 COMEX/an
WP2 - New approaches for energy transition	Call for 1 PhD and recruitment	Call for 1 PhD and recruitment	Call for 1 post-doc and recruitment. First PhD defense.	Last PhD defense.	3 doctorants / 3 post-doctorants / 3 Masters
WP3 - Deepseafloor Interactions	Call for 2 PhD and recruitments	Call for 2 PhDs and 1 post-doc. Recruitments	Call for 1 post-doc and recruitment. First PhD defenses.	Last PhD defenses.	8 doctorants / 4 post-doctorants / 6 Masters
WP4 - Uncertainties, risk assessment and territorial integration	Call for 1 PhD and recruitment	Call for 1 PhD and 1 post-doc. Recruitments	First PhD defense. Last PhD defense.		3 doctorants / 1 post-doctorant / 1 Master
WP5 - Communication and interaction with other LUE projects	Organization, planning of debates and exhibitions	Creation of the basis for the emergence of think tanks.	Organization of an international conference	Final reporting	Workshop ECCESEL (plateforme UE CCS) Exposition Gaz de charbon (REGALOR) 3 séminaires avec CR Deepsurf Conference (08/2021) 2 Rapports annuels Journée jeunes chercheurs (02/2021) Think Tank (discussion initiale)

Ils ont montré que DEEPSURF est le cadre de nombreuses nouvelles collaborations entre laboratoires, équipes et partenaires industriels et qu'il est le lieu de nombreux partenariats socio-économiques. Ces partenariats se traduisent par le co-financement d'actions de recherche par effet levier à hauteur de près de 500 k€.

Cette présentation s'est conclue par une réflexion sur la crise COVID et ses impacts sur l'avancée du projet. L'occasion de rappeler que cette crise a causé des retards dans le déroulement de projets expérimentaux (accès limité aux plateformes, relationnel contraint), des retards pour l'acquisition de données de terrain (déplacements restreints, risque de travail isolé, etc.), un isolement (angoisse, souffrances, maladies), des échanges limités entre les parties prenantes (encadrants, partenaires...) et la famille, des abandons ou reprogrammations de rendez-vous (séminaires, conférences, excursions), des difficultés de recrutement de CDD étrangers, des demandes de prolongations de thèses et post-doc, et qu'elle a généré des incertitudes parfois insupportables.

Des échanges ont eu lieu entre les experts et le COMEX puis une discussion générale a clos l'exercice qui a donné lieu au compte-rendu du COMEX LUE ci-dessous :



L'état d'avancement du projet a été présenté par Jacques Pironon avec des zooms par plusieurs contributeurs de différents laboratoires et différentes disciplines. Cette présentation a mis en évidence la grande diversité disciplinaire, incluant l'importance des Sciences Humaines et Sociales dans les questions liées à la transition énergétique ; l'intérêt de bénéficier de deux sites pilote d'envergure ; une activité de dissémination appuyée, que ce soit par les séminaires et la conférence internationale prévue en octobre 2021, que par la contribution marquée à la Culture Scientifique, Technique et Industrielle. Parmi les pistes prospectives, on peut noter le sujet émergent de la traçabilité des métaux, ainsi que l'idée d'établir un « think tank » sur la transition énergétique et écologique. Quelques difficultés sont évoquées, en premier lieu les retards et autres impacts de la crise Covid-19 dans l'exécution du projet, mais aussi un besoin de mise en perspective sur les bases de données géologiques, ainsi que le défi de l'ouverture à l'Europe.

Les échanges avec les experts et le comité exécutif LUE ont porté sur les points suivants :

- Le projet DEEPSURF s'intéresse à des questions qui sont au cœur de problématiques économiques et sociétales majeures du 21<sup>e</sup> siècle, et qu'on retrouve par exemple dans la réflexion nationale sur les sciences de la durabilité ou dans l'objectif neutralité carbone 2050. Le stockage du CO<sub>2</sub> est notamment considéré comme un enjeu territorial fort. La transition énergétique, incluant des questions comme le stockage de l'hydrogène fait aussi partie des marqueurs importants de DEEPSURF.

# Chiffres clés

- 14 doctorants
- 8 post-doctorants
- 11 stagiaires
- + 3 M€ de budget
- Env. 100 personnes impliquées
- **7 actions de recherche (co-)financées par les partenaires**
- 4 startups soutenues
- 1 programme de CSTI (ORAGE)
- 2 rapports annuels



## 5 axes thématiques

Axe 1 : Management

Axe 2 : Nouvelles approches pour la transition énergétique

Axe 3 : Interactions profond - surface

Axe 4 : Risques et intégration territoriale

Axe 5 : Communication

- *Le fort niveau d'intégration de disciplines très variées, mais aussi de niveaux de TRL différents, est remarquable ; on peut dire que cette dimension intégratrice représente l'ADN de DEEPSURF et lui donne une vocation à servir de référence en France et en Europe. L'intégration forte de la dimension humaine dans les interactions fonds/surface est en particulier extrêmement pertinente. Il existe probablement peu de projets au niveau européen qui ont le même niveau d'intégration. Il serait d'autant plus intéressant de tirer profit de ces atouts pour faire du projet et de sa dynamique une véritable référence européenne. Une manière d'attaquer cette dimension pourrait être par le biais de la formation doctorale (réseaux Marie Curie, par exemple).*
- *Le projet est à l'interface avec plusieurs communautés du site, notamment les Labex Arbre et Ressources 21. Il pourrait être utile de renforcer aussi les synergies avec la dynamique impulsée sur l'énergie, par exemple dans le projet IMPACT ULHyS.*
- *Jusqu'ici, le projet n'a pas intégré la dimension climat. Cela fait partie des perspectives qui mériteraient peut-être d'être explorées, de même que l'accentuation de la dimension sûreté/sécurité, avec les contributions qu'elle peut apporter aux aspects réglementaires. La dimension numérique pourrait elle aussi être développée de manière plus large.*
- *Le projet adresse des éléments cruciaux de différenciation pour la Région Grand Est autour de la transition écologique et énergétique, ou le stockage géologique. L'approche qu'il préconise est donc intéressante pour le territoire et le moment est probablement venu de la poser au niveau régional, même si la Région ne semble pas pour l'instant faire des ressources ou du potentiel du sous-sol une priorité de sa politique.*
- *Des sujets qui méritent sans doute une attention toute particulière sont ceux des dimensions sociale et éthique dans les projets de stockage géologique, ainsi que la dimension sociale qui reste toujours délicate au niveau local.*

## ACCOMPAGNEMENT FINANCIER 2022

Le projet IMPACT DEEPSURF a bénéficié d'une tranche supplémentaire de crédits afin d'accompagner la fin du projet dans les meilleures conditions possibles. L'objectif est de conforter, voire d'intensifier, la production scientifique de DEEPSURF en lien avec les recommandations émises par le COMEX de LUE lors du point d'étape à mi-parcours de DEEPSURF de février 2021.

Du fait de la situation sanitaire en 2020 et 2021, de nombreuses actions de recherche ont pris du retard, notamment pour celles qui nécessitaient des missions de terrain, des collectes d'échantillons ou des participations à congrès.

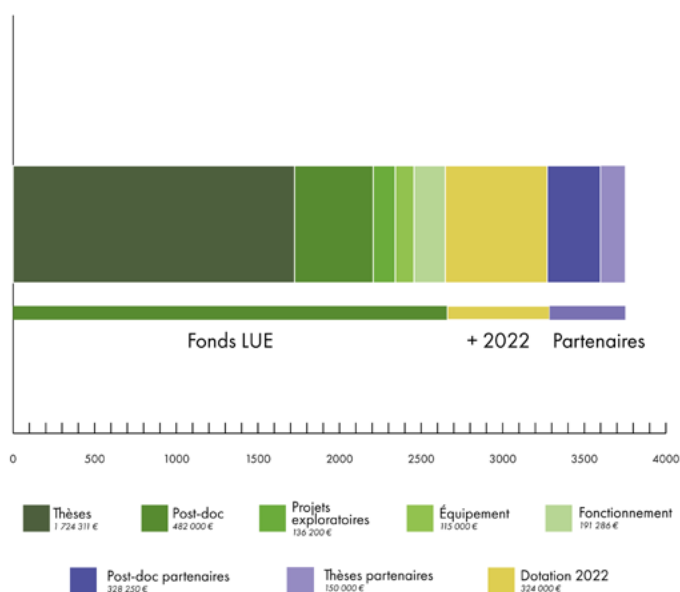
L'évaluation à mi-parcours de l'IMPACT DEEPSURF a mis en évidence un certain nombre de dimensions peu abordées dans le projet, ce sont ces dimensions qui ont été privilégiées ici. Nous avons construit cette demande de soutien en mettant en avant ces dimensions, sans oublier le cœur du projet autour des transitions énergétiques et écologiques ainsi que leur intégration territoriale.

- Impacts climatiques passés et futurs (115 k€)
- Sûreté et sécurité liées aux nouveaux usages du sol et du sous-sol (30 k€)
- Transitions et intégrations territoriales (74 k€)

Par ailleurs, ce soutien permet aussi de financer un demi-poste de chargée de communication, le salaire d'un manager de projet, et contribuera à l'organisation de la DEEPSURF Conference #2. Le montant alloué par l'I-SITE LUE avoisine les 324 k€.

Au total, le budget géré par DEEPSURF aura atteint près de 3,5 M€, essentiellement dédié à l'appui aux jeunes chercheurs, soit 800 k€ de plus que le budget initial.

### RÉPARTITION BUDGÉTAIRE



Par ailleurs le COMEX DEEPSURF a décidé de soutenir des stages à hauteur de 36 k€ sur l'année universitaire 2021-2022

Thématique	Porteurs	Demande	Fonctionnement
Inventaire forestier	Cédric Véga	Stage M2	3 600 €
Effet du CC sur la forêt	Clémentine Ols, Jean-Daniel Bontemps	Stage M2	3 600 €
Effet du CC sur la forêt	Jeanne Touche, Marie-Pierre Turpault	Stage M2	3 600 €
Cycle du carbone	Clémentine Chirol, Geoffroy Séré, Delphine Derrien	Stage M2 environné	5 000 €
Cycle du carbone	Romain Hamelsdaël, Raymond Michels	Stage M2	3 600 €
Aspects économiques de la transition énergétique	Toho Hien, Serge Garcia, Christophe Schwartz	Stage M2	3 600 €
Développement de capteurs de gaz	Mathieu Lazerges	Stage DUT	3 600 €
Sûreté d'ouvrages souterrains	Emilio Abi Aad, Olivier Deck, Marianne Conin	Stage M2	3 600 €
Préparation et contrôle de standards pour la mesure gaz et saumures	Marie-Camille Caumon	Stage DUT	3 600 €
Impact territorial	Manuel Isnardon	Stage M1	2 400 €
		Total	36 200 €



## DÉPART

Tom Caquineau, manager du projet DEEPSURF, a quitté sa fonction fin 2021 pour rejoindre la région Grand Est. Tom s'est immergé dans DEEPSURF après avoir soutenu une thèse à l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) en 2017 sur l'étude géologique de changements climatiques passés (il y a 2,5 milliards d'années). Tom a su s'investir totalement pour la



communauté DEEPSURF en créant du lien entre les jeunes chercheurs et en facilitant les échanges entre laboratoires et partenaires. Grâce à sa curiosité et son ouverture d'esprit, le défi de l'interdisciplinarité a pu être gagné.

Un grand Merci pour cet engagement et bon vent en Grand Est !

## LU DANS LA PRESSE

### Les défis du « zéro pétrole »

DOSSIER

Energie, transport, pétrochimie... Envisager l'après-pétrole implique un bouleversement technologique, économique et sociétal. La clé de cette transition énergétique est entre les mains des gouvernements, qui devront arbitrer entre réponse à l'urgence climatique et maintien du pouvoir d'achat

#### « Pour optimiser la production d'énergie, il faudra toujours du plastique »

**POUR RAYMOND MICHELS, chercheur au CNRS et à l'université de Lorraine, spécialisé dans la géochimie des hydrocarbures, la fin du pétrole n'est pas pour demain, car on continuera d'exploiter ses gisements pour l'industrie chimique.**

##### Pourquoi la chimie

##### a-t-elle besoin de pétrole ?

Tout simplement parce qu'il s'agit d'une matière unique sur Terre, pour sa teneur en énergie, mais aussi pour sa richesse en molécules et pour leur diversité. Comme le pétrole dérive de la matière vivante [*phytoplankton*], le processus de synthèse organique a déjà rassemblé le carbone et l'hydrogène en dizaines de milliers de molécules que vous pouvez exploiter d'une manière ou d'une autre. C'est d'ailleurs pour cela que, selon moi, brûler du pétrole comme une simple énergie relève de l'hérésie !

##### La chimie peut-elle se passer de pétrole, dont les ressources ne sont pas infinies ?

Oui, mais il faudrait une quantité énorme d'énergie pour synthétiser une molécule organique à partir d'une source abondante en carbone ou en hydrogène, c'est-à-dire le gaz carbonique et l'eau. Pour résumer, si vous voulez avoir en main une molécule organique, soit vous la prélevez dans le vivant, soit vous la prélevez dans le pétrole, qui est un dérivé du vivant.

##### De même que pour l'énergie, les alternatives chimiques au pétrole supposent-elles un potentiel conflit d'usages ?

La majorité de l'énergie renouvelable en France reste le bois, il en faudrait donc une quantité très importante pour remplacer le pétrole aujourd'hui dans le domaine de l'énergie. Très vite, nous n'aurions

plus de forêts. En chimie, vous pouvez fabriquer tous les précurseurs chimiques à partir du vivant, mais il vous faudrait tout un ensemble d'étapes de transformation. Fabriquer tous les précurseurs chimiques à partir du vivant pourrait entrer directement en concurrence avec la production agricole. A moins d'imaginer des fermes marines avec des élevages d'algues en quantité phénoménale.

##### Quel est le risque environnemental de l'usage du pétrole comme matière première ?

Le problème principal du réchauffement climatique tient à l'émission de dioxyde de carbone [ $CO_2$ ], qui dérive des combustibles fossiles. Si nous n'utilisons plus le pétrole comme source d'énergie, la fraction de pétrole utilisée dans le domaine de la chimie ne participera pas à une combustion fossile. A mon avis, même si nous

cessons d'utiliser le pétrole comme une source d'énergie, nous continuerons à exploiter ses gisements pour l'industrie chimique.

##### Du moins, tant que ces ressources seront disponibles...

La conversion énergétique de notre système industriel nécessitera du polymère, probablement aujourd'hui le matériau le plus sophistiqué. Si vous voulez fabriquer une voiture électrique, il y a peu de chances que sa carrosserie soit en acier, il s'agira sûrement de polymère. C'est une matière de très haute technologie, légère, résistante, avec des avantages énormes sur tout ce qui est métallique. Regardez autour de vous : même pour optimiser votre production d'énergie, il vous faudra du plastique, puisqu'il vous faut des calculateurs, des ordinateurs... ■

PROPOS RECUEILLIS PAR A. PT

Raymond Michels, Chercheur au CNRS travaillant dans le laboratoire GeoRessources est à l'honneur dans le colonnes du Monde dans un article intitulé *Les défis du "zéro pétrole"*.



Photo : CNRS

## DEEPSURF CONFERENCE

### Ambition : devenir un rendez-vous incontournable

L'année a été marquée par l'organisation, du 12 au 14 octobre 2021, d'un congrès scientifique international, la DEEPSURF Conference. Ce congrès invite les chercheurs, industriels et décideurs à contribuer au débat sociétal sur les questions des transitions écologiques et énergétiques.

Ce congrès a pour ambition de devenir un rendez-vous annuel incontournable sur la scène scientifique nationale et internationale pour les questions d'usage des sols, du sous-sol et des forêts pour les transitions énergétiques et écologiques. Une édition 2022 est en préparation...

Les deux journées de conférence étaient partagées entre des sessions plénières traitant des grands enjeux liés à la transition écologique et énergétique. Les congressistes ont également pu participer à quatre sessions techniques, traitant plus en profondeur les sujets liés aux :

- Utilisations du sous-sol à des finalités énergétiques,
- Rôles des sols dans la transition énergétique,
- Forêts en transition, de l'augmentation de la production de biomasse au stockage de carbone,
- Aspects sociaux, juridiques et économiques de la transition énergétique.



### L'ancrage territorial, essence du projet DEEPSURF

La journée du 13 octobre était dédiée à des excursions dans la région Grand Est, afin d'asseoir la proximité du projet DEEPSURF avec son territoire. Ces excursions faisaient partie intégrante du congrès, au même titre que le dîner de gala, qui a eu lieu dans les prestigieux Grands Salons de l'Hôtel de Ville de Nancy.



Les congressistes ont eu le choix pour découvrir des installations uniques :

- Le laboratoire souterrain pour le stockage de déchets radioactifs de l'ANDRA à Bure, ainsi que les dispositifs expérimentaux de simulation de sécheresse et de gestion durable des forêts de l'INRAE à Montiers-sur-Saulx.
- La dernière mine de sel en activité en France, ainsi qu'un paysage unique engendré par la proximité avec la couche géologique de sel : les mares salées dans la vallée de Marsal et sa flore tout à fait unique.
- Une rétrospective de l'âge d'or du charbon en France grâce à une reconstitution grandeur nature d'une mine au Musée Wendel de Petite-Rosselle et une découverte des dispositifs expérimentaux de mesure et de caractérisation des gaz en grande profondeur sur le site pilote européen du projet Regalor (Ressources Gazières de Lorraine).





### Des conférenciers de renom

Malgré le contexte sanitaire encore contraignant, huit conférenciers ont animé les deux séances plénières, les 12 et 14 octobre :



- Olivier Vidal (Institut des Sciences de la Terre de Grenoble), géologue et coordinateur du réseau ERA-MIN, spécialiste des ressources minérales pour la transition énergétique qui a proposé une intervention intitulée *"The energy-mineral resources nexus in the context of energy transition"* ;
- Denis Angers (Agriculture and Agri-Food, Canada), spécialiste du stockage de carbone dans les sols agricoles, a proposé une nouvelle perspective, avec son intervention *"Carbon sequestration in agricultural soils: a Canadian perspective, but not only!"* ;
- Alan Butcher (GTK, Helsinki), professeur au service géologique de Finlande, travaille sur la traçabilité des métaux et des minéraux perspective et nous a fait part de la vision finlandaise dans une intervention intitulée : *"Unifying the need for new battery mineral sources, novel carbon sequestration strategies, and the protection of soils, whilst at the same time managing public expectations & opinions - a Finnish perspective"* ;
- Michel Deshaies (LOTERR, Nancy), professeur à l'Université de Lorraine, il est spécialisé dans la géographie de l'énergie en Europe s'est exprimé sur les *"Geographical issues of the European Green Deal"* ;
- Laurent Saint-André (Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, Nancy), chercheur à l'INRAE, spécialiste du stockage de carbone dans les forêts a proposé une communication intitulée *"Forest and biomass within the energy transition: a SWOT analysis"* ;
- Noémie Fayol (IMT Mines, Alès), créatrice d'un MOOC sur les ressources minérales pour la transition énergétique qu'elle a fait découvrir grâce à son intervention *"Building a new path: from materiality to ecological transition in training - MOOC "Mineral resources and transitions"."*

- Samuele Furfari (Université Libre de Bruxelles), spécialiste des politiques énergétiques à la Commission européenne, qui a ouvert le congrès avec une intervention intitulée *"What are the impacts of energy transition on the geopolitics of energy?"* ;
- Jean-Daniel Bontemps (Laboratoire de l'Inventaire Forestier, Nancy), expert de l'inventaire des forêts européennes et des effets du changement climatique, avec une communication intitulée *"Forest monitoring in France and Europe - overview and challenges"* ;



## Publications de 2021

Adisaputro D.; De Donato P.; Saint-Andre L.; Barres O.; Galy C.; Nourrisson G.; Piedevache M.; Derrien M., Baseline Subsoil CO<sub>2</sub> Gas Measurements and Micrometeorological Monitoring: Above Canopy Turbulence Effects on the Subsoil CO<sub>2</sub> Dynamics in Temperate Deciduous Forest. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1753. <https://doi.org/10.3390/app11041753>

Alrammouz R., Lazerges M., Pironon J., Bin Taher I., Randi A., Halfaya Y., Gautier S., "V2O5 gas sensors: A review". *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 332, Part 2, 2021, 113179. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113179>

Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Davarzani H., Deparis J., Faure P., A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change, *Science of The Total Environment*, Volume 806, Part 1, 2022, 150412 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150412>

Deshaies M. (2021). "Pacte vert et enjeux énergétiques dans l'UE: l'étrange ambiguïté de la politique énergétique allemande", *Allemagne d'aujourd'hui*, n° 236, avril-juin 2021, p. 43-57.

Evans M. E. K., DeRose R.J., Klesse S, et al. 2021. The case for adding tree rings to North America's national forest inventories: an essential tool to guide drawdown of atmospheric CO<sub>2</sub>. *BioScience*. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab119>

Gombert P.; Lafortune S.; Pokryszka Z.; Lacroix E.; de Donato P.; Jozja N. Monitoring Scheme for the Detection of Hydrogen Leakage from a Deep Underground Storage. Part 2: Physico-Chemical Impacts of Hydrogen Injection into a Shallow Chalky Aquifer. *Appl. Sci.* 2021, 11, 2686. <https://doi.org/10.3390/app11062686>

Lathuilière B., Carpentier C., Huault V., Martin-Garin B. New biological zonation of a late Jurassic coral reef complex (Lorraine, France). *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* (2021). <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02070-4>

Nguyen H. N. G., Scholtès L., Guglielmi Y., Donzé F. V., Ouraga Z., & Souley M. (2021). Micromechanics of Sheared Granular Layers Activated by Fluid Pressurization. *Geophysical Research Letters*, 48(14), e2021GL093222. <https://doi.org/10.1029/2021GL093222>

Oliveira C., Aravecchia S., Pradalier C., Robin V., & Devin S. (2021). The use of remote sensing tools for accurate charcoal kilns' inventory and distribution analysis: Comparative assessment and prospective. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 105, 102641. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102641>

Ols C. & Bontemps J.-D. 2021. Pure and even-aged forestry of fast growing conifers under climate change: on the need for a silvicultural paradigm shift. *Environmental Research Letters* 16 024030. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abd6a7>

Ols C., Gschwantner T., Schadauer K. & Bontemps J.D. 2021. Unexpected negative effect of soil water availability on conifer forest growth trends detected across an oceanic-continent European gradient in a warming context. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00663-3>

Plain C., Epron D. (2021). Pulse labelling of deep soil layers in forest with <sup>13</sup>CH<sub>4</sub>: testing a new method for tracing methane in the upper horizons, understory vegetation and tree stems using laser-based spectrometry. *Biogeochemistry* 153, 215–222. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00775-x>

Privalov V.; Pironon J.; de Donato P.; Michels R.; Morlot C., Izart A. Natural Fracture Systems in CBM Reservoirs of the Lorraine–Saar Coal Basin from the Standpoint of X-ray Computer Tomography. *Environ. Sci. Proc.* 2021, 5, 12. <https://doi.org/10.3390/IECG2020-08772>

Sagar A., Vega C., Piédallu C., Bouriaud O., Renaud J.-P. Multisource forest inventories: a new model-based approach using k-NN to reconcile forest attributes statistics and map products. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Submitted).

Sainte-Marie J., Barrandon M., Saint-André L., Gelhaye E., Martin F., Derrien D. (2021) C-STABILITY an innovative modeling framework to leverage the continuous representation of organic matter. *Nat Commun* 12, 810 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21079-6>

Simon P.-A., Stoica R. S. and Sur F. An application of neural point processes to geophysical data. *Proceedings RING*, Nancy, 2021. Preprint HAL, hal-03294911.

Skovsgaard J.-P., Johansson U., Holmström E., McCarthy Tune R., Ols C. & Attocchi G. 2021. Effects of thinning practice, high pruning and slash management on crop tree and stand growth in young even-aged stands of planted silver birch (*Betula pendula* Roth). *Forests*, 12(2), 225; <https://doi.org/10.3390/f12020225>

Stoica R. S., Deaconu M., Philippe A. and Hurtado L., Shadow Simulated Annealing: a new algorithm for approximate Bayesian inference of Gibbs point processes. *Spatial Statistics*, 43, 2021.

Touche J., Calvaruso C., De Donato P., Turpault ML. (2022) Five successive years of rainfall exclusion induce nutritional stress in a mature beech stand. *Forest Ecology and Management* 507: 119987. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119987>

Vega C., Renaud J.-P., Sagar A., Bouriaud O., A new small area estimation algorithm to balance between statistical precision and scale, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 97, 2021, 102303, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102303>

Yung L., Blaudez D., Maurice N., Azou–Barré A., Sirguey C. (2021). Dark septate endophytes isolated from non-hyperaccumulator plants can increase phytoextraction of Cd and Zn by the hyperaccumulator *Noccaea caerulea*. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11793-x>

Yung L., Sirguey C., Azou-Barré A., et Blaudez D. (2021). Natural fungal endophytes from *Noccaea caerulea* mediate neutral to positive effects on plant biomass, mineral nutrition and Zn phytoextraction. *Frontiers in Microbiology* 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.689367>

## Communications scientifiques de 2021

A. Randi, C. Kervévan, J. Pironon, J. Sterpenich, V. Privalov, C. Morlot. A new concept combining CO<sub>2</sub> geological storage and geothermal heat recovery: results of experimental simulations. DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Aurélien Randi, Christophe Kervévan, Jacques Pironon, Jérôme Sterpenich, Vitaliy Privalov, et al. A new concept combining CO<sub>2</sub> geological storage and geothermal heat recovery: results of experimental simulations. Decarbonization in the European Union and New Paradigm for the Development of Fuel & Energy Complex in Russia, Aug 2021, Kazan, Russia. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03455557>

Bras N., Consommation de méthane par les sols forestiers : variabilité spatiale des processus physiques et biotiques impliqués en vue d'estimer le puits des forêts lorraines, Journée Jeunes Chercheurs DEEPSURF, 16 février 2021

Cardoso, C. D.; Pik, R.; Caracausi, A. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He tracing of crustal fluids transfer related to hazards. DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Cardoso, C. D.; Pik, R.; Caracausi, A.; Halldorsson, S.; Stefansson, A.; Zimmermann, L. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He Monitoring of Groundwater in Hafnalækur, North Iceland: Preliminary Results. In: Goldschmidt 2021, Online. Goldschmidt 2021 Abstracts. <https://doi.org/10.7185/gold2021.6810>

Catherine Fruchart, Xavier Rochel, Pierre Montpied, Jean-Luc Dupouey, "Woodstock - Historical reconstruction of wood stocks and fluxes", Poster DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Cavelan, A., Colombano, S., Davarzani, H., Deparis, J., Lorgeoux, C., Tinet, A. J., ... & Faure, P. (2021, June). New experimentations about the effect of groundwater fluctuations on the multiphase mobilization of LNAPL contaminants: assessment and monitoring. In AquaConSoil 2021 (No. 48491, p. 123).

Cavelan, A., Faure, P., Golfier, F., Tinet, A. J., Oltean, C., Colombano, S., ... & Enjelvin, N. (2021, October). A new experiment to assess the impact of groundwater table level variations on petroleum hydrocarbon pollutants remobilization (LNAPL) in the climate change context. In 1<sup>st</sup> OZCAR TERENO International conference: Advancing critical zone science (Vol. 37, pp. 240-241).

Cavelan, A., Faure, P., Lorgeoux, C., Colombano, S., Deparis, J., Davarzani, H., ... & Golfier, F. (2021, September). How Do the Groundwater Level Fluctuations May Affect the Remobilization of Lnapls?. In IMOG 2021 (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-2). European Association of Geoscientists & Engineers.

Cavelan, A., Golfier, F., Colombano, S., Enjelvin, N., Davarzani, H., Deparis, J., & Faure, P. (2021, November). Impact des fluctuations du niveau d'une nappe phréatique induites par les changements climatiques sur la remobilisation des hydrocarbures pétroliers raffinés légers (LNAPLs). In 27<sup>e</sup> édition de la Réunion des Sciences de la Terre (RST).

Cavelan, A., Golfier, F., Colombano, S., Enjelvin, N., Davarzani,

H., Deparis, J., ... & Faure, P. (2021, April). Impact of groundwater level variations induced by climate change on the mobilization of light refined petroleum hydrocarbon contaminants (LNAPLs). In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-4081).

Cavelan, A., Golfier, F., Lorgeoux, C., Colombano, S., Deparis, J., Davarzani, H., ... & Faure, P. (2021, October). An investigation of the fate of petroleum contaminants (LNAPL) under fluctuating groundwater table levels induced by climate change. In DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Clémentine Chirol, Delphine Derrien, Laurent St André, Catherine Galy, Paul-Olivier Redon, Geoffroy Séré (2021). COSMOS - Compromises and optimisation of ecosystem services provided by soils : a list of objectives. Journée des Jeunes Chercheurs DEEPSURF [poster en ligne 16/02/2021]

Clémentine Chirol, Delphine Derrien, Laurent St André, Catherine Galy, Paul-Olivier Redon, Olivier Therond, Geoffroy Séré (2021). Mapping bundles of soil ecosystem services in agricultural and forested lands at the regional scale. DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France. [présentation orale]

Fruchart C., "Woodstock – Reconstruction historique de stocks et flux de bois", Comité scientifique #5 DEEPSURF, 26 novembre 2021, 2021

Hien Toho, "Modelling soil ecosystem services provision by coupling production frontiers and Structural Equation Modelling", Conseil Scientifique #4 DEEPSURF, 3 juin 2021

Hien Toho, "Production de biomasse énergétique suivant un gradient d'anthropisation des sols. Analyse croisée du capital naturel et de la valeur économique des services écosystémiques rendus" Journée Jeunes Chercheurs DEEPSURF, 16 février 2021

Hien Toho, Séminaire annuel des doctorants du BETA Nancy

Iktiham Bin Taher, Yacine Halfaya, Rouba Alammouz, Mathieu Lazerges, High electron mobility transistor-based hydrogen sensor using ITO as a sensing layer, 2021 IEEE Sensors, October 2021, DOI:10.1109/SENSOR547087.2021.9639820

J. Pironon, O. Barres, Ph. de Donato, P. Faure, A. Randi, J. Sterpenich. Survey strategies around an industrial CCS demonstrator in France. DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Jacques Pironon, Odile Barres, Philippe de Donato, Pierre Faure, Aurelien Randi, Jérôme Sterpenich. Survey strategies around an industrial ccs demonstrator in france. Decarbonization in the European Union and New Paradigm for the Development of Fuel & Energy Complex in Russia, Aug 2021, KAZAN, Russia. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03455364>

Jeanne Touche - « Five successive years of rainfall exclusion induce a double stress in a mature beech stand » DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Jeanne Touche - Participation au forum des jeunes chercheurs des journées ReGeFor (21-24 juin 2021).

Jeanne Touche «Effects of 5 years of experimental drought on adult beech» - Présentation orale du sujet de thèse et poster à la Journée des Jeunes Chercheurs DEEPSURF, 16 février 2021.

Jean-Pierre Renaud, Ankit Sagar, Pierre Barbillon, Olivier Bouriaud, Christine Deleuze, Cédric Vega, Convex hull: another perspective about model predictions and map derivatives from remote sensing data, *SilviLaser 2021*, 17<sup>th</sup> conference on Lidar Applications for Assessing and Managing Forest Ecosystems 28/09/2021 30/09/2021 Vienne + online Autriche open access proceedings, <https://doi.org/10.34726/wim.1919>

Kutlu Céline, La géothermie profonde en Alsace : une acceptabilité sociale contrastée, obstacle ou garant d'une véritable transition énergétique ?, *Science&You*, Novembre 2021

Kutlu Céline, La lente et difficile revalorisation des sites et sols pollués : le frain juridique [Poster], DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Kutlu Céline, L'adaptation de l'agriculture irriguée aux épisodes de sécheresse en France : vers une meilleure gestion quantitative de l'eau, *Journée d'étude des doctorants IRENEE*, Juillet 2021

Loïc Yung, Catherine Schmitt-Sirguy, Damien Blaudez. (2021). Mastering plant-plant-microorganisms interactions to improve the phytomanagement of trace elements-contaminated sites. DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France (Poster).

Loïc Yung, Viotti C, Albrecht K, Amaduci S, Bardos P, Bertheau C, Bothe L, Cazaux D, Ferrarini A, Govilas J, Gusovius H-J, Jeannin T, Lühr C, Müssig J, Pilla M, Placet V, Puschenreiter M, Tognacchini A, Chalot M and Blaudez D. (2021). Potential of fungal endophytes as biological amendment to improve the growth and fibre production of *Urtica dioica* L. in a contaminated soil. NETFIB meeting November 8-9, 2021, Piacenza, Italy (Com).

Md. Iktiham Bin Taher, Yacine Halfaya, Rouba Alrammouz, Mathieu Lazerges, Aurelien Randi, Tarik Moudakir, Nossikpendou Yves Sama, Thomas Guermont, Nicolas Pelissier, Thomas Pichler, Médéric Piedevache, Jacques Pironon, Simon Gautier. New HEMT based gas sensors for in-situ bio-geochemical analysis. DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Michel Deshaies, "Geographical issues of the European Green Deal", DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Nguyen, H. N. G., Scholtès, L., Guglielmi, Y., Donzé, F. V., Ouraga, Z., and Souley, M.: Grain scale investigation of shear reactivation by fluid pressurization, *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-7855, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7855>, 2021.

Oliveira Cláudia, Aravecchia Stéphanie, May L, Pradalier Cédric, Robin Vincent & Devin Simon. Poster: You can't run but you can hide: towards an automated detection of charcoal production sites through image analysis. "Historical Ecology for the Future" International Conference. 21/25-28 May 2021 (online event).

Oliveira Cláudia, Aravecchia Stéphanie, Pradalier Cédric, Robin Vincent & Devin Simon. Poster: Automatic detection of charcoal production platforms by deep learning techniques – a case study in northeastern France. Meeting of the European Association of Archaeologists "EAA 2021 – Widening Horizons" 8-11 September 2021. Poster communication (online event).

Oliveira Cláudia, Bouquerel Jonathan, Devin Simon & Robin Vincent. Characterization of ancient charcoal production activity in Northeastern France: first results of a study site in Meuse. Historical Ecology for the Future International Conference. 21/25-28 May 2021 (online event).

Oliveira Cláudia, Bouquerel Jonathan, Rochel Xavier, Devin Simon & Robin Vincent. Evidence for a hornbeam woodland from charcoal kilns in Meuse lowlands (NE France): past management record or local anomaly?. Meeting of the European Association of Archaeologists "EAA 2021 – Widening Horizons". 8-11 September 2021 (online event).

Oliveira Cláudia, Bouquerel Jonathan, Rochel Xavier, Devin Simon & Robin Vincent. From the forest to the forge: charcoal production in northeastern France lowlands (XVII-XX centuries). DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Ols C., Dynamiques de croissance des conifères le long de Gradients Environnementaux franco-autrichiens. Séminaire scientifique du Laboratoire d'Inventaire Forestier (IGN), 9 avril 2021, Nancy

Ols C., Gschwantner T., Schadauer K. & Bontemps J.D. Towards a systematic and continuous monitoring of climate change impacts on forest productivity in Europe, DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Ols C., Impact du climat récent sur la productivité des forêts métropolitaines. Conseil scientifique #5 de DEEPSURF, 26 novembre 2021, Nancy.

Ols C., L'impact du climat récent sur la croissance radiale des forêts métropolitaines, Basculement de l'Inventaire Forestier National (IGN) 2021, 3 novembre 2021, Vierzon.

Ols C., Monitoring des effets du changement climatique sur les dynamiques de croissance des forêts françaises, Café Recherche et Développement de l'Office National des Forêts, 22 janvier 2021, visioconférence.

R. Alrammouz, I. Bin Taher, Y. Halfaya, A. Randi, T. Guermont, N. Pelissier, M. Lazerges, J. Pironon, S. Gautier "Nouvelle technologie microélectronique de capteurs de gaz pour des applications géologiques." Presented poster to Ecole résidentielle interdisciplinaire en nanosciences et nanotechnologies Erquy, France, 4-9 Juillet 2021.

Renaud, J.-P., Sagar, A., Barbillon, P., Bouriaud, O., Vega, C. Convex hull: another perspective about model prediction and map derivative from remote sensing data. In *Proceedings of the SilviLaser Conference 2021*, Hollaus M. & Pfeifer N. (Eds), Vienna, Austria, 28–30 September 2021, PP71-73.

Reype Christophe, Gibbs point process for Bayesian statistical analysis of hydrogeochemical data applied to source detection in multicomponent mixtures, DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Reype Christophe, Spatial Statistics and Image Analysis in Biology, Mai 2021

Romain Hemelsdaël, Laurent Beccaletto, Olivier Averbuch, Alain Izart, Raymond Michels, et al., Structural evolution of the Permo-Carboniferous Saar-Lorraine (France, Germany): a transition from the late Variscan compression to lithospheric delamination. ILP Workshope IFPEN (poster).

Romain Hemelsdaël, Laurent Beccaletto, Olivier Averbuch, Alain Izart, Raymond Michels, et al.. Tectono-stratigraphic evolution of the Permo-Carboniferous Lorraine-Saar basin constrained by 3D geological modeling (France, Germany). 27<sup>e</sup> Réunion des Sciences de la Terre, Nov 2021, Lyon, France.

Romain Hemelsdaël, Laurent Beccaletto, Olivier Averbuch, Alain Izart, Raymond Michels. Decipher the evolution of the Permo-Carboniferous Lorraine-Saar basin (France, Germany) by constructing a regional 3D geological model. DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Sagar Ankit, Presented a part of PhD thesis at Deepsurf Yung Researchers Day (February 2021)

Sagar Ankit, Presented a part of PhD thesis at SIRENA seminar (March 2021)

Sagar, A., Véga, C., Piédallu, C., Bouriaud, O., & Renaud, J.-P. (2021). High Resolution Mapping of Forest Resources and Prediction Uncertainty using Multisource Inventory Approach. In Proceedings of the SilviLaser Conference 2021 (pp. 219–221). <https://doi.org/10.34726/wim.1986>

Sagar, A., Vega, C., Piedallu, C., Bouriaud, O., Renaud J.-P. High resolution mapping of forest resources and prediction uncertainty using multisource inventory approach. In Proceedings of the SilviLaser Conference 2021, Hollaus M. & Pfeifer N. (Eds), Vienna, Austria, 28–30 September 2021, <https://doi.org/10.34726/wim.1986>

Sagar, A., Vega, C., Piedallu, C., Bouriaud, O., Renaud, J.-P. High resolution mapping of forest resources and prediction uncertainty using multisource inventory approach. 41<sup>st</sup> INCA international conference, Chandigarh, India, October 27-29, 2021.

Tchang-Tchong Laurie, Pierre Faure, Catherine Lorgeoux, Eric C. Gaucher, Raymond Michels. Evaluation of eroded mesozoic formations on Northern Alsace (France) using organic geochemistry and basin thermal modelling. 30th International meeting on Organic Geochemistry - IMOG 2021, Sep 2021, Online, France

Tchang-Tchong Laurie, Raymond Michels, Pierre Faure, Catherine Lorgeoux. Estimation of the thickness of eroded Mesozoic formations in the Pechelbronn area (Alsace) using basin thermal modelling and organic geochemistry. DEEPSURF Conference, Octobre 2021, Nancy, France.

Tchang-Tchong Laurie, Raymond Michels, Pierre Faure, Catherine Lorgeoux. Les hydrocarbures comme marqueurs des transferts entre les compartiments géologiques profonds et la zone critique. Le cas du secteur de Pechelbronn. 27<sup>e</sup> Réunion des Sciences de la Terre, Nov 2021, Lyon, France.

Vega, C., Renaud, J.-P., Sagar, A., Bouriaud O., Planells, M. Estimation et cartographie d'attributs forestier haute résolution : le potentiel des approches multisource. Atelier Théia sur les utilisations de la télédétection pour la forêt, Montpellier, 11-12 octobre 2021.




Photo : Jacques Pironon



**Recherche**





# **Axe 2. Nouvelles approches pour la transition énergétique**



Mesure de l'épaisseur de la couche de charbon de bois à l'aide d'une tarière. La couche de charbon de bois est une couche sombre plus ou moins épaisse constituée de terre mélangée à des restes de la production de charbon de bois, à savoir des fragments de charbon de bois et des cendres.

## Ana Claudia Oliveira

Charbon de bois et charbon : des ressources énergétiques à fort impact sur l'environnement passé et des enjeux pour la transition énergétique

Thèse encadrée par Vincent Robin (LIEC) et Simon Devin (LIEC)

### Contexte

L'étude des archives de charbon de bois dans les forêts donne l'occasion de se pencher sur le passé car le charbon de bois était une source d'énergie très utile à l'époque pré- et industrielle (métallurgie). Ainsi, la recherche sur ces sources d'information est cruciale pour comprendre l'histoire, les changements et la dynamique des écosystèmes passés qui ont conduit aux héritages actuels dans la forêt et dans l'environnement.

### Avancée de la thèse en 2021

L'année 2021 a été dédiée à la diffusion, pour l'essentiel, des résultats déjà obtenus au cours des deux années de travail précédentes. Les points clés abordés dans ce rapport mettent en évidence les résultats concernant (1) la détection et la distribution des charbonnières, (2) l'analyse chronologique, (3) la diversité de l'assemblage de charbon de bois. Une deuxième partie est liée aux héritages de la production de charbon de bois sur l'environnement avec les (4) résultats d'analyse de sol et (5) les données de végétation actuelles liées aux charbonnières.

Ainsi, le premier article relatif à la détection et à la quantification des charbonnières a été publié.



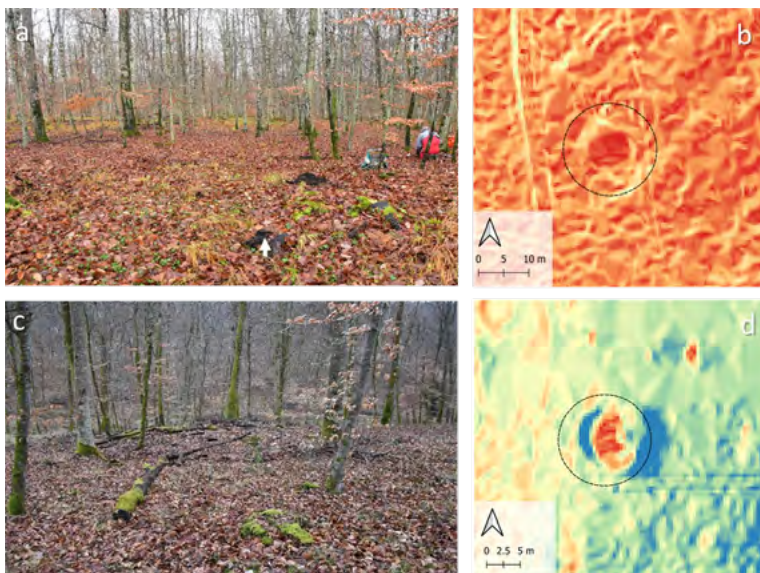
**LIRE SA PUBLICATION**

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102641>

Les principales remarques de ce travail sont liées au potentiel de détection automatique des charbonnières de manière rapide et fiable, mais en tenant compte de la nécessité d'effectuer une validation sur le terrain afin d'obtenir une détection plus précise. Un autre résultat pertinent à mentionner est que la répartition des charbonnières dans la zone est principalement liée à la propriété plutôt qu'à d'autres facteurs socio-environnementaux (par exemple, la pente ou l'altitude). Il a également été démontré que l'identification des



Vue générale du boisé de la zone d'étude; ici la photo est dans la Forêt Communale de Mandres-en-Barrois.



Exemples de charbonnières dans la zone d'étude dans des pentes contrastées : a) charbonnière dans une zone plate, b) représentation correspondante sur une image LiDAR dérivée de la pente, c) aspect d'une charbonnière dans une zone escarpée, d) représentation correspondante sur une image LiDAR dérivée de la pente.

charbonnières dans les images était plus précise lorsqu'elle était effectuée par un opérateur humain que la détection automatique. Il a été mis en évidence la nécessité de conjuguer les résultats par opérateur humain et de machine learning pour améliorer la détection automatique afin d'effectuer régulièrement ces tâches de détection sur de plus grandes zones. Ce travail a été réalisé en collaboration avec des collègues de GeorgiaTech Lorraine à Metz.

Concernant l'approche classique des études des charbonnières sur la diversité des macro-restes, les résultats finaux obtenus à partir des études de charbons de bois ont confirmé la dominance de *Carpinus betulus* (charme) aux côtés de *Fagus* (hêtre), *Corylus* (noisetier) ou *Quercus* (chêne). Ces données, combinées à l'estimation du diamètre des fragments et à l'investigation de documents historiques écrits issus des archives départementales, ont permis d'affirmer que l'ancienne structure boisée était gérée en régime de bosquets. Dans ce régime, les grands arbres matures étaient commercialisés comme bois d'œuvre (principalement le chêne et le hêtre) et le bois de petit calibre était utilisé comme matière première pour la production de charbon de bois. L'utilisation de *Carpinus* pour la production de charbon de bois est connue, mais une dominance à une telle échelle n'a, à notre connaissance, aucun parallèle dans d'autres domaines. Les résultats de datation du radiocarbone ( $n = 18$ ) et de la luminescence stimulée optiquement (trois résultats

### Financement supplémentaire en 2021

En raison de la pandémie qui a gravement impacté les activités de recherche sur mon projet, le financement et le temps supplémentaires ont permis de finaliser le premier article ainsi que les dernières campagnes de terrain qui ont été reportées au printemps 2022.

utilisables) ont souligné que l'activité a eu lieu à l'époque moderne (après 1650). L'OSL et l'investigation des documents historiques ont été réalisées en collaboration avec des chercheurs de l'Université de Gand en Belgique et du laboratoire LOTERR - Université de Lorraine. La publication de ces résultats est en cours de finalisation.

L'empreinte de la production de charbon de bois dans l'environnement a donné ses premiers résultats après l'échantillonnage de six fours à l'été 2020 et l'étude de la végétation l'été dernier (47 transects analysés). L'analyse des sols a révélé qu'il y a, en effet, une interférence de l'activité de production de charbon de bois dans la teneur en éléments des sols (par exemple, le carbone ou le calcium) et la micromorphologie a révélé qu'il existe certaines preuves de la réutilisation des plates-formes ce qui est important pour bien comprendre l'impact de la récolte du bois à l'époque historique. Concernant la végétation actuelle, certains indices montrent que la présence de charbonnières a des impacts sur le couvert végétal selon un gradient de distance, avec des espèces favorisées et d'autres impactées négativement. Les résultats suggèrent que la présence de fours est un agent d'hétérogénéité qui a encore des implications écologiques des siècles après la fin de l'activité.

Enfin, les progrès réalisés au cours de 2021 aboutiront au manuscrit de thèse qui sera soutenue au premier semestre 2022.

## Toho Hien

Production de biomasse énergétique suivant un gradient d'anthropisation des sols. Analyse croisée du capital naturel et de la valeur des services écosystémiques rendus.

Thèse encadrée par Serge Garcia (BETA) et Christophe Schwartz (LSE)

L'objectif de ma thèse est d'analyser, à la fois sous les angles écologiques et économiques, les concepts de capital naturel et de services écosystémiques (SE) rendus par les sols, appliqués à des écosystèmes contrastés, situés au sein d'un gradient d'anthropisation (sites forestiers « naturels », sites très anthropisés urbains, miniers et industriels, plus ou moins gérés par des procédés du génie écologique) et ayant pour vocation de produire de la biomasse énergétique.

### Travaux réalisés

Au cours de la première année de thèse, nous avons fait l'état de l'art de la littérature existante. Nous avons actualisé cette revue de littérature et nous l'avons restructurée pour publication sous forme d'article de recherche. Cet état de l'art nous a permis de dégager des pistes de recherches dont certaines ont été approfondies cette année.

Deuxièmement, nous construisons des modèles de changement de productivité en y intégrant les caractéristiques des sols. Nous utilisons l'indicateur de productivité Luenberger-Hicks-Moorsteen. Nous avons ainsi défini un indice de performance des sols agricoles. Cela permet d'analyser l'impact des caractéristiques des sols sur les changements de production des exploitations agricoles.

Troisièmement, j'ai encadré un stage de Master 2 sur la modélisation des fonctions de production de biomasse énergétique et des services écosystémiques associés sur différents sols. L'objectif du stage est d'introduire la notion de capital naturel dans les fonctions de production de SE



rendus par les sols et de comparer les résultats avec les modèles n'intégrant pas le capital naturel des sols. Les caractéristiques des sols (représentant le capital naturel) ont été introduites directement comme facteurs de production dans la fonction de production. En utilisant des données de simulation, les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux modèles. Partant de ce résultat, nous avons proposé une approche qui permet d'estimer le capital naturel des sols comme un indice. Nous avons utilisé les modèles d'équation structurelle (SEM). Le capital naturel du sol est une interaction entre l'état physique, l'état chimique et l'état biologique des sols (figure 1). Chaque état du sol a des indicateurs de sol qui permettent de l'estimer.

Ce capital naturel a ensuite été intégré dans les modèles économiques. Cela nous a permis d'une part d'analyser les interactions entre les services écosystémiques rendus par les sols et d'autre part, d'étudier l'impact de la prise

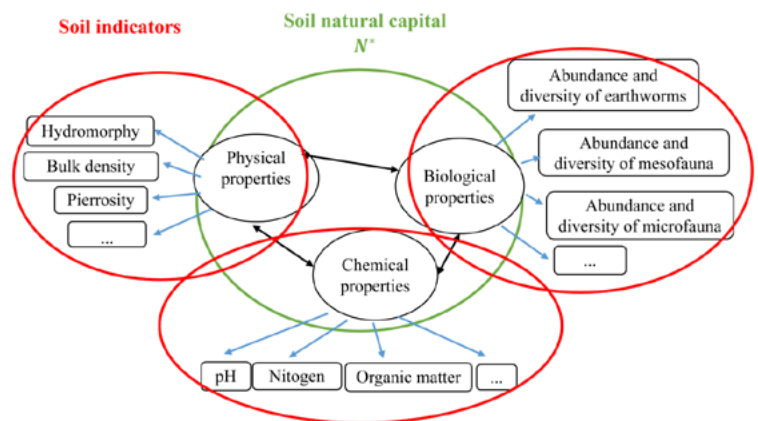


Figure 1 : SEM for soil natural capital estimation

en compte de ce capital naturel sur les scores d'efficacité des exploitations agricoles. Les résultats montrent que la non prise en compte du capital naturel du sol dans les modèles pourrait conduire à une surestimation des scores d'efficacité. De plus, les analyses montrent qu'il y a un trade-off entre les SE d'approvisionnement en biomasse et de régulation du climat à travers le stockage de carbone



dans les sols.

Quatrièmement, nous avons collecté des données pour tester ces modèles. Cette étape de collecte et de nettoyage de données a été la plus longue et a concerné trois principales sources de données. La première base de données a été mise à disposition par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA). Ces données du site de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) contiennent des variables de production, des itinéraires techniques de production et des caractéristiques des sols. La deuxième source de données est la Chambre Régionale d'Agriculture du Grand Est (CRAGE). La CRAGE dispose du référentiel régional pédologique (RRP) qui est une base de données sur les caractéristiques des sols. Nous avons obtenu le RRP de la Lorraine et celui de l'Alsace. La troisième source de données est le ministère de l'Agriculture. Ces bases de données agricoles et forestières étant non anonymisées, nous avons eu recours au Centre d'Accès Sécurisé aux Données (CASD). Le nettoyage de ces données est toujours en cours.

En perspective, nous finaliserons le traitement des données et nous testerons nos différents modèles. Ensuite, nous aborderons les autres pistes de recherche à savoir

l'estimation économique des services écosystémiques rendus par les sols, et le couplage entre méthode écologique et méthode économique pour l'estimation des services écosystémiques rendus par les sols. Enfin, nous présenterons ces travaux à des conférences nationales et internationales.

### Présentations

Au cours de la Journée Jeunes Chercheurs DEEPSURF, j'ai fait une communication orale sur mon sujet de thèse et j'ai présenté un poster sur le processus de modélisation du capital naturel des sols.

J'ai fait une autre communication à la quatrième réunion du conseil scientifique de DEEPSURF. Elle a été l'occasion de présenter mes travaux sur l'intégration du capital naturel des sols dans les modèles économiques et ses conséquences sur les scores d'efficacité des exploitations agricoles.

Enfin, j'ai présenté ces travaux au séminaire annuel des doctorants du BETA Nancy.



# Ankit Sagar

Inventaire forestier multisource : un nouvel outil générique et flexible pour répondre aux enjeux territoriaux d'estimation et de cartographie haute-résolution des gisements en bois

Thèse encadrée par Cédric Véga (LIF)

Les forêts jouent un rôle vital dans l'équilibre écologique, la stabilité environnementale, contribuant substantiellement au développement économique d'un pays. Pour utiliser efficacement les ressources forestières, il est nécessaire de connaître la quantité et l'état des forêts. Les inventaires forestiers nationaux (NFI) sont une source majeure d'informations sur le terrain. Ils sont basés sur des conceptions statistiques rigoureuses et fournissent des estimations agrégées précises des ressources forestières (par exemple, le volume du matériel sur pied, le volume de la surface terrière) à l'échelle nationale, voire régionale.

Au-delà de ces échelles, la précision des estimations du NFI diminue en raison du faible nombre de parcelles de terrain du NFI. Les méthodes d'inventaire multisources (MSNFI) tirent parti de la disponibilité croissante des données de télédétection pour améliorer la précision des estimations du NFI dans de petits domaines géographiques, comme les municipalités. Les méthodes MSNFI sont au stade de développement en France. La méthode a été testée avec succès dans les forêts feuillues de plaine de Sologne, pour des groupements de communes. Pour une utilisation opérationnelle, la méthode doit être testée dans des conditions forestières et topographiques plus complexes. En outre, les IFN se consacrent à la production de statistiques forestières, mais il existe une demande supplémentaire pour la fourniture de données cartographiques à haute résolution (~10-30 m), ainsi que la production d'estimations des ressources forestières dans des domaines non administratifs. C'est par exemple le cas des perturbations forestières, telles que l'attaque du scolyte, qui nécessitent des domaines d'estimation spécifiques.



## Objectifs

Les objectifs du doctorat sont de :

- Tester le potentiel des méthodes MSNFI dans un écosystème forestier plus complexe,
- Développer une approche statistique pour estimer les ressources forestières impactées par l'infestation de scolytes,
- Fournir une méthode cohérente pour produire des cartes mur à mur des attributs forestiers avec leur fiabilité de prédiction.

L'étude s'est concentrée sur la forêt de plaine de Sologne et d'Orléans, et la forêt entourant le massif vosgien. Les données auxiliaires suivantes ont été prises en compte pour cette étude : (i) données de nuages de points 3D obtenues à partir de la photogrammétrie aérienne numérique (DAP) et du balayage laser aéroporté (ALS), (ii) images de télédétection optique des satellites d'observation de la Terre Landsat 8 et Sentinel 2, (iii) des cartes thématiques

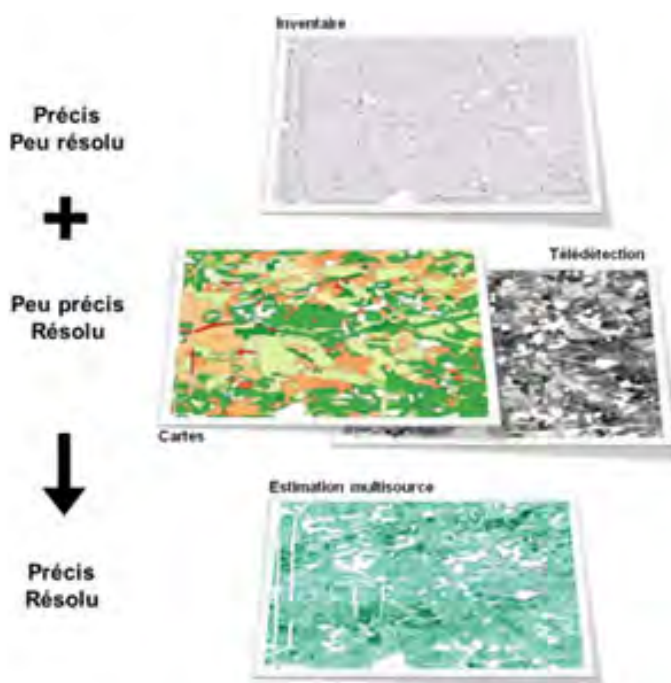
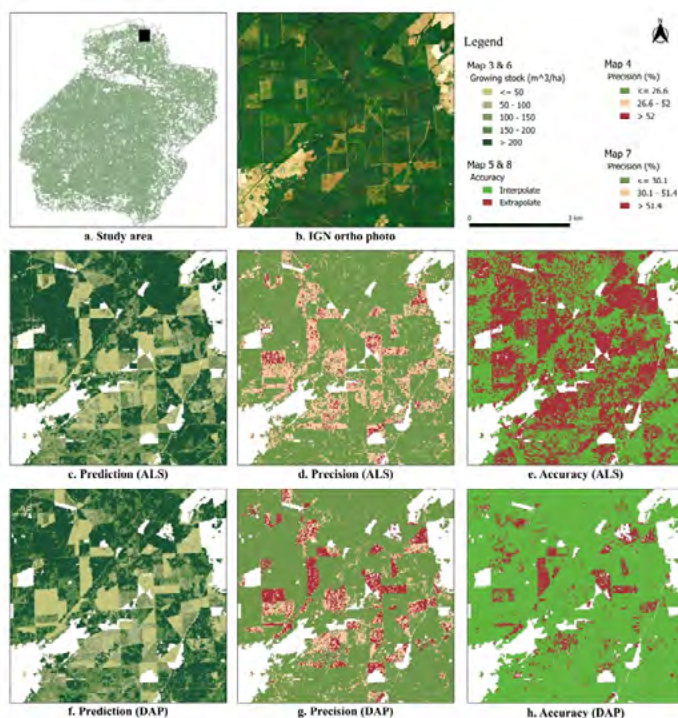




Photo : Clémentine Ols

décrivant les types de forêts, (iv) des données climatiques et (v) des données sur les propriétés des sols. Nous avons développé une méthode pour estimer les attributs forestiers d'un groupe de municipalités formées selon des critères d'erreur, équilibrant ainsi la précision statistique et l'échelle géographique (Vega et al. 2021). La méthode repose sur l'inférence assistée par modèle, dans laquelle les estimations sont pilotées par les mesures de terrain et les données auxiliaires, ce qui contribue à diminuer la variance d'estimation. Pour la production de cartes à haute résolution, une inférence basée sur un modèle est requise,

dans laquelle les estimations sont pilotées par le modèle reliant les mesures de terrain aux données auxiliaires. Comme les prédictions des modèles sont sujettes à des biais, une approche originale a été développée en utilisant une combinaison de techniques de rééchantillonnage et géométriques pour cartographier la précision et la validité des prédictions de pixels (Sagar et al., soumis). La méthode sera améliorée pour corriger le biais d'extrapolation. Nous étudions actuellement le potentiel de cette méthode pour fournir des estimations dans les zones impactées par l'attaque de scolyte dans la forêt vosgienne.



### Financement supplémentaire pour 2021

Nous avons reçu un financement supplémentaire de 6800€ en 2021 pour la poursuite du doctorat. Ces fonds seront utilisés comme soutien financier pour des conférences et des publications. Nous avons également reçu 3600€ de DEEPSURF pour un stage M2. Nous avons également reçu des fonds de TOSCA CNES pour un projet connexe (Projet SLIM).

Map Products for ALS and DAP based prediction, pixel precision classes, and accuracy for GSV. The nomenclature of each map with associated values is provided in the map legend.



Photo : Clémentine Ols  
- Scan d'une carotte  
d'arbre



Photo : Clémentine Ols

## Clémentine Ols

RESFORCLIM - Suivi instantané et tendanciel de l'acquisition des ressources forestières françaises face au changement climatique

Post-doctorat encadré par Jean-Daniel Bontemps (LIF) et Olivier Bouriaud (LIF)

L'ensemble des travaux du projet ont pris fin en janvier 2022. Après deux ans d'analyses, le projet RESORCLIM a atteint l'ensemble des 4 objectifs qu'il s'était fixé depuis février 2020.

**Objectif 1** – Déployer un système de suivi temporel inter-régional de la productivité des peuplements forestiers

Un package R a été développé pour améliorer l'ergonomie et la vitesse des analyses (ensemble de fonctions de calcul prédéfinies). L'automatisation de la construction des

modèles est terminée et a même été optimisée. Les autres fonctionnalités du package (ex. production de cartes d'anomalies, analyse climat-croissance) ont été finalisées et intégrées. L'ensemble du package est fonctionnel depuis décembre 2021. Il aussi a permis le transfert opérationnel des résultats dans la production régaliennne de l'IGN.

**Objectif 2** – Systématiser l'approche opérée sur les essences résineuses aux essences feuillues productrices de bois matériau et de biomasse énergétique

- Un cortège de quatre essences feuillues a pu être étudié (chênes pédonculé, sessile et pubescent, et hêtre) dans 12 systèmes régionaux différents. Leurs chronologies d'anomalies de productivité ont été produites grâce à l'automatisation des modèles.
- Les chronologies de l'ensemble des essences (conifères et feuillues) ont également pu être allongées jusqu'en 2019 suite à la publication de nouvelles campagnes de l'inventaire forestier national.

**Objectif 3** – Développer et mettre en place un suivi spatialisé de la production forestière

- La méthodologie de quantification des anomalies de productivité à l'échelle locale a été finalisée et





Photo : Clémentine Ols - L'inventaire d'une placette forestière

systématisée à l'ensemble des systèmes forestiers étudiés (Figure 1).

- La production des cartes d'anomalies de productivité annuelles et l'inclusion de la méthodologie associée au sein du package R a été finalisée à l'hiver 2021.

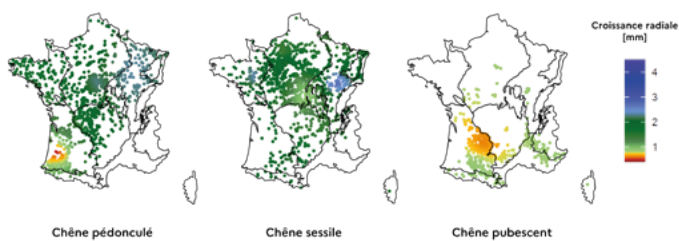


Figure 1. Impact du climat de 2019 sur la variation spatiale de la croissance radiale des trois essences de chêne en peuplements purs et réguliers

**Objectif 4** – Identifier les origines climatiques des anomalies de production forestière

Des résultats ont montré une hétérogénéité de sensibilité au climat entre essences conifères et feuillues, avec une sensibilité beaucoup plus marquée chez les conifères. Un effet négatif significatif de l'augmentation des températures maximales d'été et de la baisse des précipitations pendant cette même saison a été identifié (Figure 2).

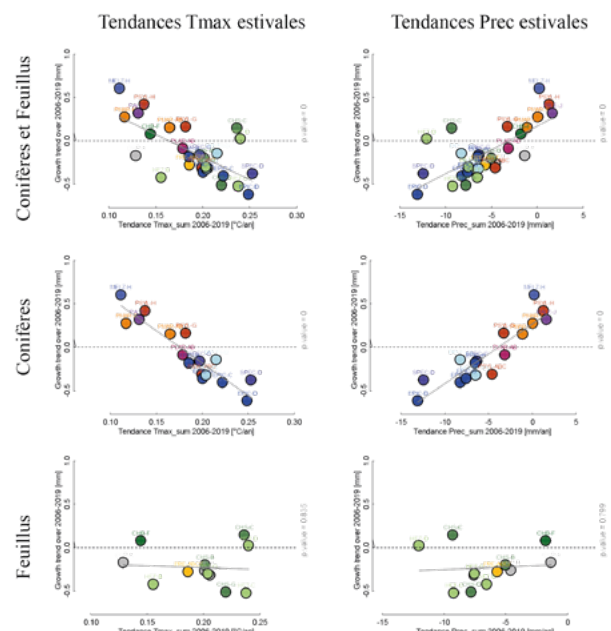


Figure 2. Corrélations entre les tendances de productivité des 26 systèmes d'étude et les tendances des températures maximales (Tmax) et précipitations (Prec) estivales entre 2006 et 2019.



**LIRE SES PUBLICATIONS**

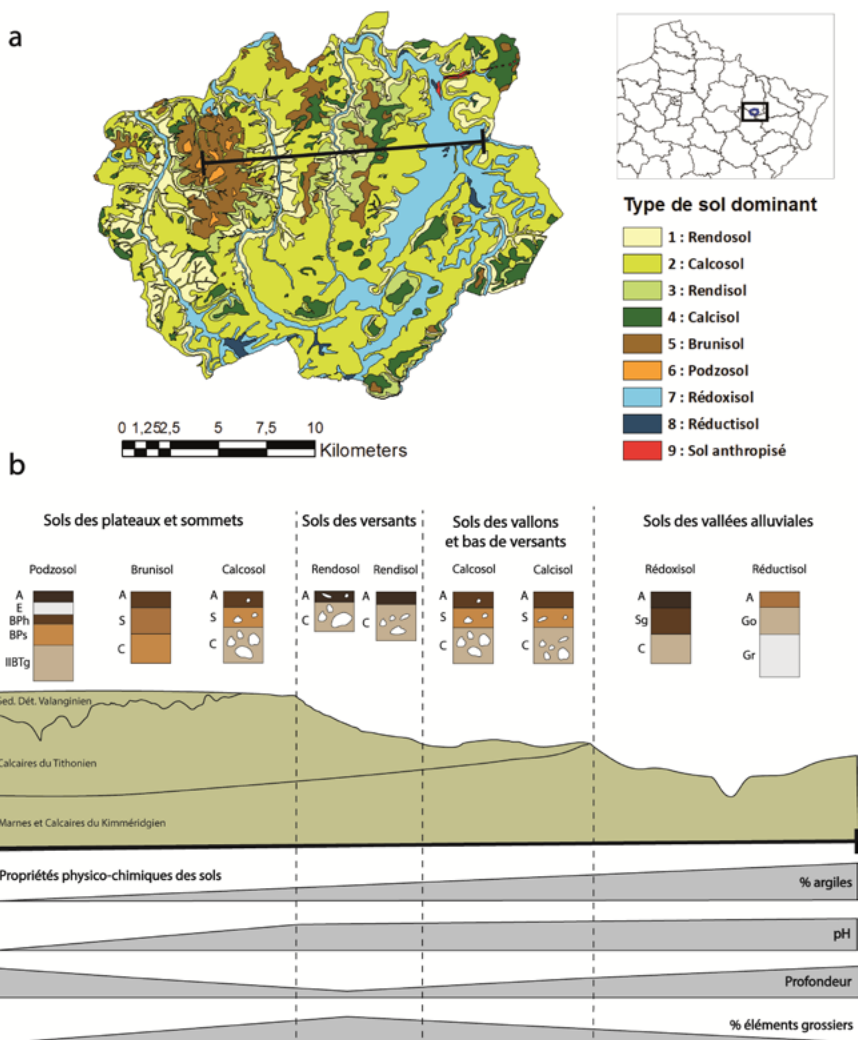
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abd6a7>  
<https://doi.org/10.1007/s10021-021-00663-3>



# Clémentine Chirol

COSMOS : Compromis et optimisation des services écosystémiques

Post-doctorat encadré par Geoffroy Séré (LSE) et Delphine Derrien (BEF)



## Contexte

L'aménagement des territoires fait face à des défis à la fois climatiques et socio-économiques pour assurer la transition écologique à l'horizon 2050. Dans ce cadre, un intérêt croissant est porté à la gestion des sols en raison des multiples services écosystémiques qu'ils apportent tels que la production de biomasse (alimentaire ou non), la filtration des eaux et la régulation du climat global par le stockage de carbone.

## Objectif

Le projet COSMOS vise à produire une évaluation des services écosystémiques rendus par différents types de sol selon l'occupation des territoires, en vue d'éclairer la décision publique pour optimiser les choix d'aménagement à l'échelle régionale. Le projet utilise comme cas d'étude l'Observatoire Pérenne de l'Environnement, territoire de 900 km<sup>2</sup> dominé par des occupations agricoles et forestières (Meuse/Haute-Marne, France).

Figure 1 : Localisation et représentation synthétique de la géologie, géomorphologie et pédologie de la zone OPE : a) cartographie simplifiée des types de sol ; b) coupe synthétique montrant le lien entre type de sol et contexte géologique - géomorphologique, ainsi que les principaux horizons selon le Référentiel Pédologique Français et les propriétés physico-chimiques des sols.

## Méthodologie

Le projet s'articule autour de deux axes de recherche : (1) spatialisé et optimisation des services écosystémiques rendus par les sols et (2) estimation du potentiel de stockage et du temps de résidence de carbone dans différents types de sol et selon différents modes de gestion. Les étapes méthodologiques sont les suivantes :

1. Une synthèse des types de sol de la zone d'étude est réalisée à partir de 85 profils de sol et de la carte pédologique ;
2. L'outil DESTISOL utilise une méthode de seuillages pour noter les fonctions et services écosystémiques des sols de 0 à 3, à partir d'indicateurs issus des données sol, des valeurs de pente et des occupations dans la zone d'étude ;
3. La dynamique verticale du carbone est explorée sur 6 départements autour de l'OPE à l'aide de 190 profils du RMQS et du Renecofor : les stocks de carbone sont estimés à partir de profils statistiques de taux de carbone pour chaque type de sol ; les potentiels de stockage additionnels sont estimés par la méthode des percentiles ;
4. Dans la suite du projet en 2022, des éléments de scénarios d'évolution du territoire à l'horizon 2050 seront proposés afin d'explorer leurs impacts sur les services écosystémiques.

## Résultats préliminaires

Une synthèse des types de sols, de leurs caractéristiques physico-chimiques et de leur répartition dans la zone d'étude a été réalisée (Figure 1). Les fonctions des sols ont été obtenues avec DESTISOL pour les fonctions rétention de l'eau, fertilité herbacée, carbone et érosion, ainsi que les profils verticaux de taux de carbone pour différents types et occupations de sol (Figure 2).

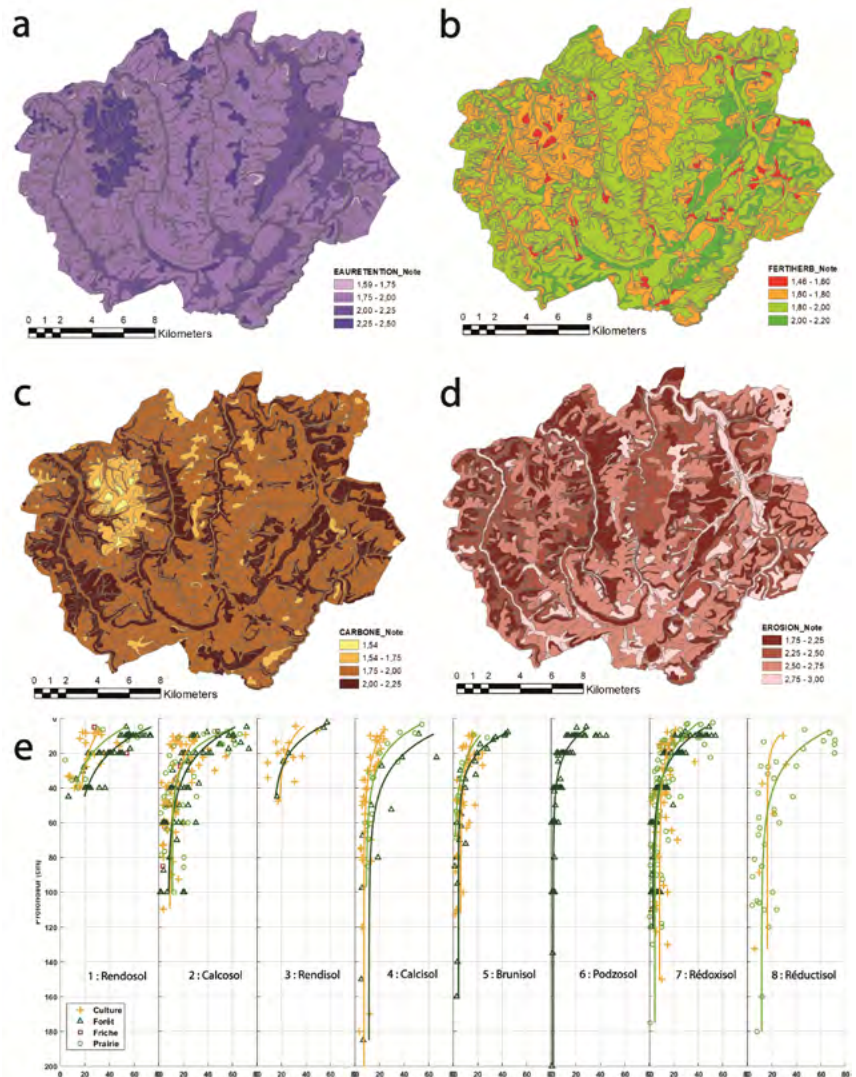


Figure 2 : Résultats préliminaires des fonctions des sols dans la zone OPE selon DESTISOL et des taux de carbone. Les fonctions sont notées sur une échelle de 0 à 3 par une méthode de seuillage ; a) rétention de l'eau ; b) fertilité herbacée ; c) carbone ; d) érosion ; e) profils verticaux des taux de carbone.

## Financement complémentaire pour 2022

Un stage de M2 intitulé « Élaboration de scénarios d'évolution d'usages des sols en fonction des projections climatiques et socio-économiques » est organisé entre février et juillet 2022 dans le cadre du projet COSMOS grâce à des financements supplémentaires DEEPSURF (5 000 €). Ce stage en pédologie-géographie explorera comment la connaissance de la fonctionnalité des sols peut éclairer la décision publique et ouvrir de nouvelles opportunités d'aménagement du territoire.

## Loïc Yung

Vers une meilleure compréhension et optimisation des interactions plantes-champignons au sein d'un système agro-forestier pour améliorer le phytomanagement des sites marginaux (PPMI)

Post-doctorat encadré par Damien Blaudez (LIEC) et Catherine Sirguy (LSE)

La gestion des sites et sols pollués par les éléments traces métalliques (ETMs) et la production de matériaux biosourcés apparaissent comme des leviers majeurs permettant de répondre aux grands enjeux environnementaux actuels. Le développement de technologies vertes capables de limiter les risques liés aux contaminants, tout en fournissant une biomasse végétale valorisable pour la bio-économie font l'objet d'une préoccupation particulièrement forte en Lorraine. Le phytomanagement regroupe un ensemble de techniques basées sur l'utilisation de plantes contribuant à réhabiliter et à revaloriser les sites contaminés. Le recours à des associations végétales pertinentes et leur inoculation avec des microorganismes favorisant la croissance des plantes (PGP) tels que les champignons endophytes, qui sont reconnus comme un levier favorable au phytomanagement. Ces microorganismes contribuent notamment à améliorer le développement des plantes et à modifier la mobilité des ETMs dans les sols. Le projet PPMI se concentre sur deux associations végétales : i) le dispositif agroforestier *Urtica dioïca* et *Populus* spp. pour la production de fibres végétales et de bois non contaminés et ii) *Salix aquatica grandis* (ligneux accumulateur) et *Noccea caerulescens* (herbacée hyperaccumulatrice) dans une stratégie de phytoextraction des ETMs.



Le projet PPMI vise à :

- Évaluer (i) la pertinence et les effets de la co-culture *S. aquatica grandis* - *N. caerulescens* sur les performances des deux plantes,
- Caractériser taxonomiquement et fonctionnellement le microbiome fongique associé à *N. caerulescens* et *U. dioïca* et
- À tester les effets d'endophytes fongiques supposés PGP sur leurs performances en contexte de phytomanagement.

Une expérimentation en mésocosme visant à appréhender les effets de la co-culture sur les performances de *N. caerulescens* et de *S. aquatica grandis* (Figure 1), nous a permis de valider la pertinence de cette association végétale pour la phytoextraction du Cd et du Zn. En effet, les résultats obtenus indiquent que la co-culture augmente significativement la biomasse aérienne de *N. caerulescens* ainsi que sa capacité d'extraction du Zn, tandis qu'elle ne semble pas avoir d'influence sur le saule. Cette amélioration des performances de *N. caerulescens* en co-culture semble en partie liée à une meilleure nutrition. Des travaux, faisant l'objet d'un sujet de stage de master 2, sont actuellement menés afin de mieux comprendre l'influence de la co-culture sur le métabolisme et le microbiome rhizosphérique des deux plantes.

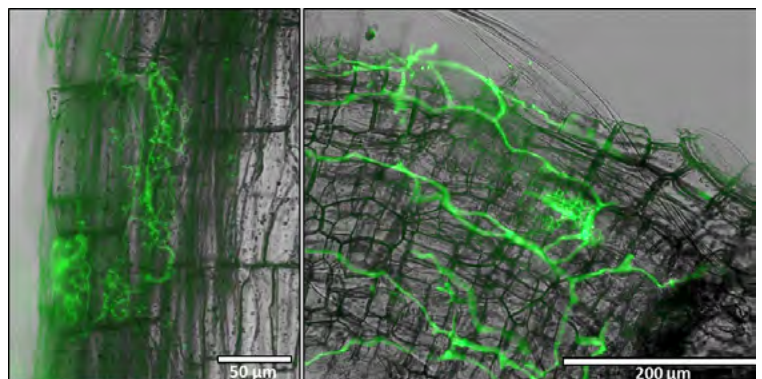


Figure 2. Observations microscopiques de racines d'*U. dioïca* colonisées par des champignons endophytes. Les structures fongiques ont été préalablement marquées par un fluorochrome.



Figure 1. Expérimentation en mésocosme visant à appréhender l'effet de la co-culture sur les performances de *N. caerulescens* et *S. aquatica grandis* dans un sol fortement contaminé par des ETMs.

Les observations microscopiques réalisées sur diverses populations d'*U. dioïca* et de *N. caerulescens*, collectées dans des sites contaminés ou non, ont permis de mettre en évidence que les endophytes fongiques colonisent activement les racines de ces plantes en conditions naturelles (Figure 2). À partir de la mise en culture de fragments racinaires, de l'isolement des souches émergentes et de leur typage moléculaire, nous avons pu détecter plus de 40 genres fongiques différents associés à chacune des deux plantes. Parmi le large panel de souches isolées, certaines ont montré des capacités PGP *in vitro* (e.g., solubilisation du phosphate, production de phytohormones, production de sidérophores). De nouvelles populations de *N. caerulescens* seront échantillonnées en avril 2022 afin de compléter nos connaissances du microbiome de cette plante.

À partir de deux études en mésocosme dans lesquelles des endophytes fongiques indigènes et non indigènes ont été réinoculés à *N. caerulescens*, nous avons identifié des souches ayant des effets positifs sur les performances de *N. caerulescens*. Ces travaux ont donné lieu à deux articles acceptés dans des journaux scientifiques à comité de lecture. De la même manière, nous avons identifié trois souches fongiques améliorant significativement l'activité microbienne du sol ainsi que la nutrition et la production de biomasse aérienne d'*U. dioïca*. Une étude par

metabarcoding environnemental, actuellement en cours, nous permettra d'appréhender les effets de l'inoculation sur la structure et la composition des communautés fongiques associées aux racines d'ortie.



#### LIRE SES PUBLICATIONS

<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11793-x>  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.689367>

#### Financement complémentaire pour 2022

Les expérimentations actuellement en cours ou prévues dans les prochains mois ont été/seront possibles grâce à un financement DEEPSURF complémentaire, sous la forme d'une prolongation de 5 mois et d'un budget fonctionnement, nous permettant de compenser une partie du retard lié à la crise sanitaire et de réaliser un déplacement sur le terrain.



Recherche



# Axe 3. Interactions profond - surface



Terrain expérimental en forêt de Montiers

## Didi Adisaputro

Métrologie, monitoring et modélisation des processus de transfert des gaz  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  au sein du système géosphère/biosphère ( - 20 / + 10 mètres)

Thèse encadrée par Philippe de Donato (GeoRessources) et Laurent Saint-André (BEF)

Ce travail de recherche s'inscrit dans le prolongement de différentes études conduites notamment dans le cadre du pilote de Capture Transport et Stockage du  $\text{CO}_2$  (pilote Total CCS, Lacq-Rousse, France) relatives au suivi des mécanismes de transfert des gaz ( $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ) dans les compartiments géosphère/biosphère/atmosphère. De ces études, il était ressorti que l'évolution de la fraction molaire de  $\text{CO}_2$  ( $\chi_c$ ) dans le sous-sol karstique du plateau du Jurançon était négativement corrélée aux battements de la nappe phréatique située à -45 mètres via des mécanismes de dissolution/dégazage. Cependant, il n'est pas encore établi si ce type de relation existe dans l'écosystème forestier, qui est un représentant important dans le cycle d'échange du  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Dans ce contexte, cette thèse se concentre sur la surveillance des échanges gazeux et de leurs processus de transfert au sein de la zone critique, entre le sous-sol (-6 m), le sol (-1 m) et le couvert végétal (+50 m).

Pour cela, nous avons développé et mis en place un système de surveillance géochimique in-situ en puits dédiés pour le suivi continu de la fraction molaire de  $\text{CO}_2$  dans le sous-sol et le sol. Ce dispositif a été couplé à un système de surveillance micrométéorologique utilisant une tour de flux préétablie dans l'écosystème forestier (Montiers, Région Lorraine, France). Au cours des périodes d'étude allant de juin 2018 à décembre 2020, l'écosystème a agi comme un puits de carbone net avec une moyenne annuelle des paramètres d'échange d'écosystème net (NEE), de productivité primaire brute (GPP) et de respiration de l'écosystème (Reco) respectivement égaux





Tours à flux de l'INRAE en forêt de Montiers



Terrain expérimental en forêt de Montiers

à - 453 grammes, -1468 grammes et 1052 grammes de carbone par mètres carrés par an. L'échange de carbone, les données météorologiques et les facteurs environnementaux durant les épisodes de sécheresse, enregistrés entre 2014 et 2017, ont été comparés rétrospectivement aux données de référence à long terme.

Contrairement à certaines recherches précédentes où les paramètres NEE et Reco ont diminué parallèlement pendant les épisodes de sécheresse, les données enregistrées sur site ont montré que le paramètre Reco est plus sensible à la sécheresse que le paramètre NEE, ce qui a entraîné une augmentation significative de l'échange net au sein de l'écosystème. Ainsi, durant les périodes de sécheresse d'été et d'automne (2018-2019), le paramètre de respiration de l'écosystème (Reco) a diminué de 20 % et de 26 % par rapport aux années de référence 2014 et 2017, respectivement.

Les traitements statistiques des données comparées provenant des compartiments sous-sol/sol/couvert végétal, montrent des preuves empiriques solides que la turbulence du vent, mesurée au travers du paramètre de vitesse de frottement ( $u^*$ ) joue un rôle important dans la variabilité des concentrations de  $\text{CO}_2$  dans les sols même jusqu'à des profondeurs de -6 m, ce qui n'avait jamais été établi. L'origine de ce type de mécanisme pourrait être liée aux effets de pompage de la pression qui diminuerait la fraction molaire de  $\text{CO}_2$  dans le sol lors de fortes

turbulences et par voie de conséquence, augmenterait le stockage du  $\text{CO}_2$  dans les sols profonds lors de faibles turbulences.

Cette étude a aussi démontré le rôle de l'hydrométrie du sol sur ces processus d'échanges. En effet, en périodes humides, la perméabilité du sol se trouve considérablement réduite ce qui diminue fortement les mécanismes de transfert par diffusion et advection moléculaires.

Cette étude a également révélé une forte influence biotique sur la production de  $\text{CO}_2$ . Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  dans le sous-sol de notre site peuvent être attribuées à la respiration et à la décomposition des plantes en  $\text{C}_3$ . Ces origines biologiques du  $\text{CO}_2$  du sol entraînent très probablement des augmentations de la densité de l'air ce qui conduit à faire migrer le  $\text{CO}_2$  stocké vers les couches plus profondes du sol par le biais d'un mécanisme de percolation gravitaire. La relation des gaz du sous-sol souligne également que les composants biogéniques dominent les origines et le processus de contrôle du  $\text{CO}_2$  du sous-sol alors que le processus géochimique joue un rôle insignifiant.

Didi Adisaputro a soutenu sa thèse le 10 décembre 2021 avec succès.



**LIRE SA PUBLICATION**  
<https://doi.org/10.3390/app11041753>

# Nicolas Bras

Consommation de méthane par les sols forestiers : variabilité spatiale des processus physiques et biotiques impliqués en vue d'estimer le puits des forêts de trois sylvoécotégions du nord-est de la France

Thèse encadrée par Caroline Plain (Silva) et Daniel Epron (Silva)

Le méthane est un des principaux gaz à effet de serre dont la concentration atmosphérique ne fait qu'augmenter. Les sols et particulièrement les sols forestiers constituent un puits de méthane important. Cette consommation de méthane par les sols représente un service écosystémique que l'on doit chercher à préserver. L'objectif principal de ma thèse est de déterminer les principaux facteurs responsables des variations spatiales de la consommation de méthane atmosphérique à l'échelle d'un massif forestier. Pour y répondre, j'ai divisé mon travail de thèse en trois axes.

## Avancées en 2021

1/Fin de rédaction de l'article

*Soil methane oxidation in naturally-regenerated oak-dominated temperate deciduous forest stands responds to soil water status regardless of their age*, dont les principales conclusions sont :

- Pas d'effet âge du peuplement sur la consommation de méthane
- Le contenu en eau du sol est le principal facteur expliquant les variations spatiales de l'oxydation du CH<sub>4</sub>
- Dans le contexte de réchauffement global, les événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses estivales longues et sévères ainsi que les événements d'engorgement importants pourraient avoir des conséquences négatives sur la consommation du méthane par les sols forestiers.

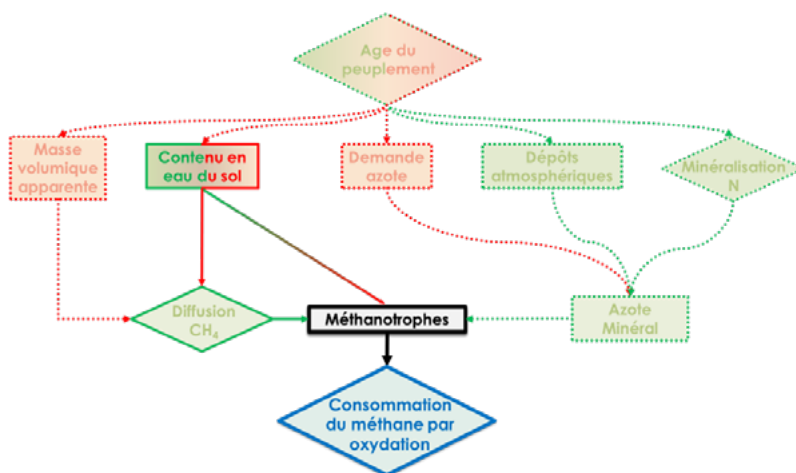


Figure 1 : Influence du contenu en eau du sol sur l'oxydation du méthane. La couleur verte représente un effet positif, la couleur rouge un effet négatif et positif et le gradient vert/rouge une influence graduelle. Les cadres carrés représentent des facteurs simples et les cadres en losanges des processus.

2/ Dernières mesures et analyses d'une expérimentation s'intéressant à l'influence de l'épaisseur et de la profondeur de sol sur l'oxydation du méthane en fonction du type de peuplement forestier.

**LIRE SA PUBLICATION**  
<https://doi.org/10.3390/app11041753>

Cette étude s'intéresse à l'oxydation du méthane dans les 15 premiers centimètres du sol pour des peuplements de hêtre, chêne, pin et épicéa. Les prélèvements réalisés durant l'été 2021 ont été effectués dans des fosses de 30 cm de profondeur dans différents horizons du sol superficiel afin d'avoir des données caractéristiques du sol à différentes profondeurs (pH, azote minéral, teneur en matière organique,...).

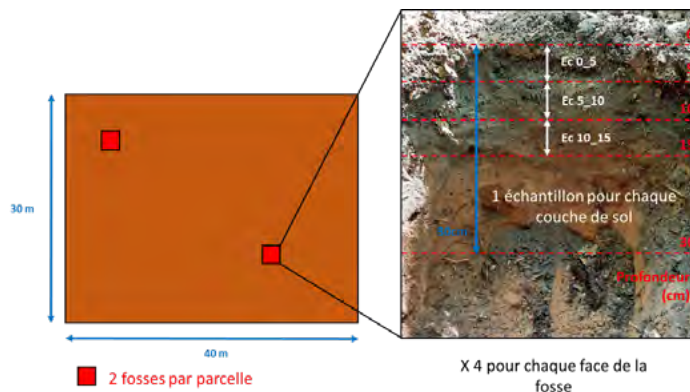


Figure 2 : Plan d'échantillonnage été 2021

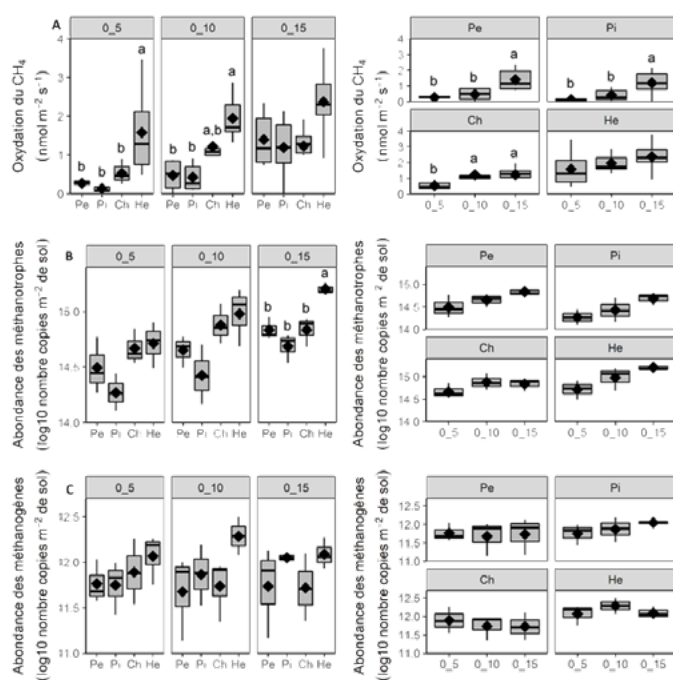


Figure 3 : Variations de l'oxydation du méthane et de l'abondance en méthanotrophes en fonction du type de peuplement et de l'épaisseur de sol.

Oxydation du  $\text{CH}_4$  (A), abondance en méthanotrophes (B) de carottes de sol incubées à 20°C. Les boxplots contiennent les valeurs de 6 échantillons pour l'oxydation et de 3 échantillons pour les abondances de chaque type de peuplement (hêtraie=He, chênaie=Ch, pinède=Pi, pessière=Pe) pour chaque épaisseur de sol (0 à 5cm=0\_5, 0 à 10cm=0\_10, 0 à 15cm=0\_15) dans le graphique de gauche et l'inverse dans celui de droite. La ligne horizontale épaisse représente la médiane, le losange représente la moyenne et la boîte représente l'écart interquartile. Les lignes verticales allient de la plus grande valeur ne dépassant pas 1,5 fois le quartile supérieur à la plus petite valeur ne dépassant pas 1,5 fois le quartile inférieur. Les valeurs extrêmes (1 à 2 valeurs) ne sont pas représentées afin de ne pas étendre l'échelle de l'axe des ordonnées. Des lettres différentes indiquent des différences significatives à  $p = 0,05$  entre les types de peuplements.

Ces prélèvements étaient couplés à des mesures d'oxydations du méthane et d'abondances en organismes méthanotrophes pour des échantillons des 5, 10 et 15 premiers centimètres du sol et réalisés l'année précédente.

L'oxydation du méthane la plus forte était liée à des profondeurs différentes pour chaque type de peuplement. L'oxydation était la plus forte entre 0 et 5 cm de profondeur pour la hêtraie, entre 5 et 10 cm pour la chênaie et entre 10 et 15 cm pour la pinède et la pessière. Lorsque l'oxydation est forte à une profondeur donnée, comme en surface pour la hêtraie ou la profondeur 5-10 cm pour la chênaie, l'oxydation diminue dans les couches de sol situées en dessous, probablement en raison d'une concentration en  $\text{CH}_4$  qui devient limitante pour les méthanotrophes.

3/ Fin de la rédaction de ma thèse

Ma thèse a été quasi intégralement rédigée en 2021. La fin du processus de rédaction s'est poursuivi en début 2022 pour un dépôt fin janvier.

### Financement supplémentaire 2021

Une demande d'aide supplémentaire pour finaliser les derniers prélèvements, les dernières analyses des composés primaires (recrutement d'un technicien en CDD), mais également une analyse métabolique plus fine (financement d'analyses métabolomiques) était nécessaire pour essayer d'expliquer la dynamique des variations de flux de méthane liées à l'ajout des exsudats racinaires des quatre espèces cibles.

**Sujet de stage Master 2 :** Influence des exsudats de quatre espèces d'arbres sur la consommation de méthane d'un sol forestier (Léonie Chrétien)

L'objectif du stage de master était de développer une méthode permettant la récolte in-situ des exsudats émis par les racines de quatre des plus importantes espèces d'arbres des forêts du N-E de la France (hêtre, épicéa, pin et chêne) afin de déterminer l'action chimique de ces exsudats sur les flux de méthane d'un sol.

La mise au point méthodologique de la récupération des exsudats racinaires a été testée puis validée au cours du stage de master. La quantification des composés majoritaires a également été effectuée.

Les flux de méthane varient en fonction de l'application des exsudats des différentes espèces d'arbre à différentes périodes de la saison de végétation. Mais les composés majoritaires quantifiés dans les exsudats ne permettent pas d'expliquer les différences de flux de méthane existantes entre les différentes espèces d'arbre.



## Christophe Reype

Estimation simultanée des paramètres et détection de structures dans les données spatialisées. Application pour l'analyse de la dynamique de mélange des fluides géologiques

Thèse encadrée par Antonin Richard (GeoRessources), Radu Stoica (IECL) et Madalina Deaconu (IECL)

Les mélanges à plusieurs composantes sont souvent étudiés en géoscience. Par exemple, en s'intéressant aux mélanges de fluides dans le sol (figure 1), il est possible d'étudier les échanges entre les milieux, la dynamique des eaux depuis la surface jusqu'à la croûte [Yardley and Bodnar, 2014] ou de détecter l'apparition de sources de pollution [Popp et al., 2021].

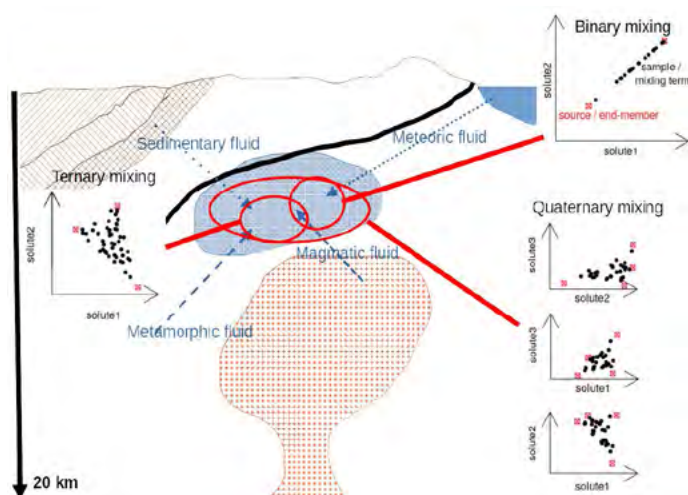


Figure 1 – Coupe schématique de la croûte continentale terrestre. Sur les cinq principales sources d'eau, quatre sont représentées : l'eau météorique, l'eau connée piégée dans les sédiments, l'eau métamorphique libérée lors de déshydratation et l'eau magmatique libérée durant la cristallisation (l'eau de mer n'est pas représentée) [Robb, 2005]. Des mélanges de deux, trois et quatre sources sont représentés : les symboles rouges représentent la composition des sources et les points représentent la composition des prélèvements.

Dans la littérature, la détection des sources se fait soit manuellement, soit en utilisant une Analyse en Composantes Principales (ACP) [Christophersen and Hooper, 1992] pour déterminer un nombre possible de sources et une Analyse de mélange de sources (EMMA) pour déterminer la composition des sources [Weltje, 1997]. Des méthodes plus géométriques existent comme dans [Pinti et al., 2020] : les sources sont les sommets du plus petit triangle (en terme d'aire) qui contient les prélèvements. Ces méthodes sont soit supervisées (et donc dépendantes de l'utilisateur), soit applicables en considérant uniquement deux composantes hydrochimiques.

Ce travail a pour objectif de développer un outil bayésien de détection de sources prenant en compte le caractère multi-dimensionnel des données, le nombre de sources inconnues et les contraintes géophysiques suivantes :

- Le nombre de sources doit être minimisé,
- L'enveloppe convexe des sources doit contenir les données,
- Les sources doivent avoir une composition proche des données,
- Les sources doivent avoir une composition significativement différente les unes des autres.

Le modèle HUG que nous avons proposé ([Reype et al., 2020] et dans un article en cours) est inspiré des méthodes de détection de pattern présent dans l'analyse d'image, l'épidémiologie et l'astronomie [Stoica et al., 2004, Stoica et al., 2007a, Stoica et al., 2005, Stoica et al., 2007b]. Le pattern de sources est estimé par la configuration de points maximisant la densité de probabilité d'un processus ponctuel de Gibbs.

Celui-ci contrôle la répartition des sources dans un espace dont les dimensions sont les compositions des différents paramètres hydrogéochimiques considérés. La simulation d'un tel processus repose sur des méthodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov, tandis que la maximisation fait intervenir un algorithme de Metropolis-Hastings. Le modèle HUG ne considère que des mélanges linéaires de sources constantes dans tous les prélèvements (ou au moins pas significativement différents). Un exemple d'application sur un jeu de données synthétiques est présenté dans les

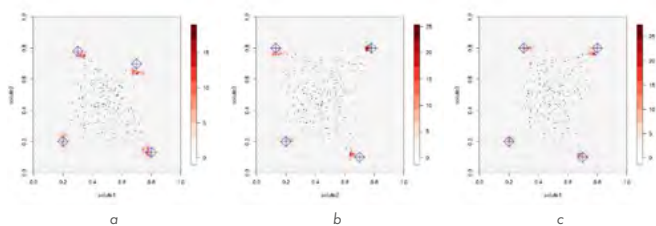


Figure 2 – Nombre de sources simulées dans une cellule carrée de côté 0.01 pour le jeu de données synthétiques dans le premier plan (a), le deuxième plan (b) et le troisième plan (c).

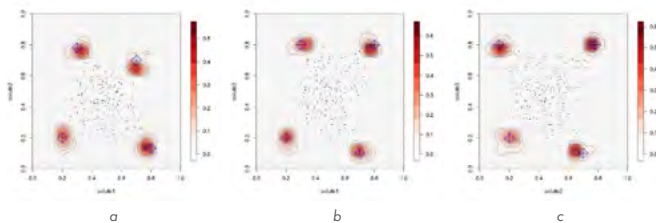


Figure 3 – Niveau de probabilité d'avoir une source simulée dans un carré centré en chaque cellule et de longueur 0.07 pour le jeu de données synthétiques dans le premier plan (a), le deuxième plan (b) et le troisième plan (c).

figures 2 et 3. Le jeu de données est construit comme un mélange de 4 sources (représentées en bleu) dans un espace à 3 dimensions résultant en 200 prélèvements. Le modèle détecte bien 4 zones ayant une probabilité supérieure à 50 % de contenir les sources simulées.

Ce travail a été présenté lors de la conférence Spatial Statistics and Image Analysis in Biology en mai 2021 et de la conférence DEEPSURF d'octobre 2021.

Actuellement, nous travaillons sur l'estimation du paramètre  $\theta$  qui caractérise le modèle, via la méthode Approximate Bayesian Computation (ABC) Shadow [Stoica et al., 2017]. Jusqu'à maintenant, ce paramètre  $\theta$  était choisi par une méthode d'essais et d'erreurs, suivie d'une confirmation visuelle. L'intérêt du travail en cours est de rendre la recherche de  $\theta$  automatique et ainsi réduire au maximum la supervision de l'utilisateur. Cette méthode est appliquée sur le même jeu de données synthétiques que précédemment.

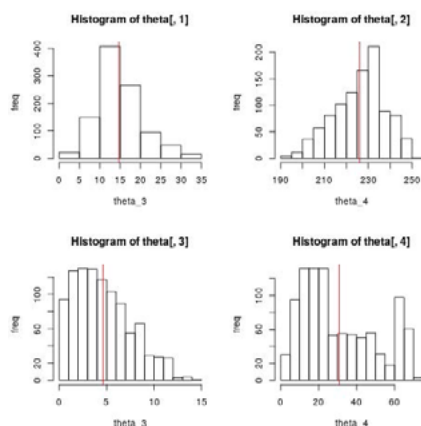


Figure 4 – Histogramme des valeurs de  $\theta$  obtenues par ABC Shadow

Les valeurs de  $\theta$  sélectionnées par cette méthode sont représentées dans la figure 4. Nous avons choisi comme loi *a priori* sur  $\theta$  la loi gaussienne de variance de chacun de ses paramètres et comme espérance la moyenne de chaque paramètre (représentée en rouge). Les résultats des simulations avec une telle loi sont représentés dans les figures 5 et 6. Nous pouvons voir que les résultats se sont améliorés : les niveaux de probabilités sont plus élevés avec cette nouvelle loi *a priori*.

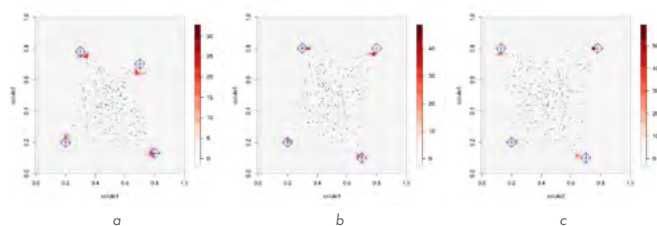


Figure 5 – Nombre de sources simulées dans une cellule carrée de côté 0.01 pour le jeu de données synthétiques dans le premier plan (a), le deuxième plan (b) et le troisième plan (c). En utilisant la loi *a priori* sur  $\theta$  défini par l'ABC Shadow.

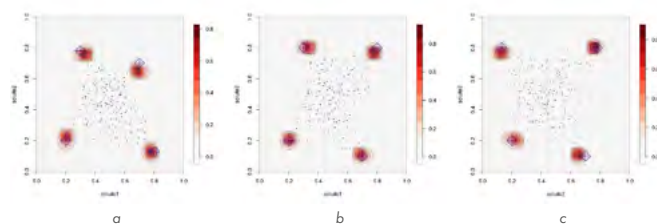


Figure 6 – Niveau de probabilité d'avoir une source simulée dans un carré centré en chaque cellule et de longueur 0.07 pour le jeu de données synthétiques dans le premier plan (a), le deuxième plan (b) et le troisième plan (c). En utilisant la loi *a priori* sur  $\theta$  défini par l'ABC Shadow.

## Financement supplémentaire 2022

Le financement complémentaire va être utilisé pour développer des activités pour et en continuation de la thèse de Christophe Reype : stages de Master 2 (R. Stoica, M. Deaconu, A. Richard), soutenance thèse (Christophe Reype), déplacements et conférences (R. Stoica, C. Reype, M. Deaconu, A. Richard).



Capsules en or avant leur chargement, en vue de réaliser les maturations artificielles des roches-mères principales du Fossé Rhénan



Échantillonnage de pétrole de la résurgence située proche de la Maison Forestière de Surbourg (Alsace, France) dans le but de réaliser des analyses élémentaires.

## Laurie Tchang-Tchong

Les hydrocarbures comme marqueurs des transferts entre réservoirs profonds et zone critique. Cas du bassin de Pechelbronn

Thèse encadrée par Raymond Michels (GeoRessources) et Pierre Faure (LIEC)

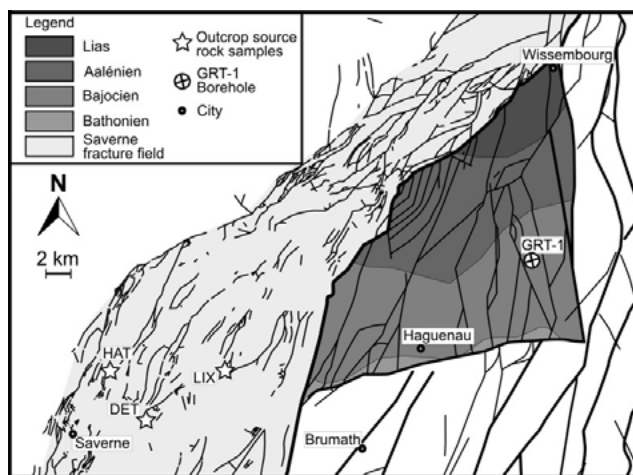
### Thématiques de recherche

Le pétrole porte son histoire géologique dans sa composition moléculaire. C'est pourquoi l'objectif de cette thèse est d'utiliser le pétrole pour retracer les transferts de fluides et reconstituer l'histoire géologique du bassin de Pechelbronn, localisé dans la partie centrale ouest du Fossé Rhénan. L'étude vise à comprendre la génération de pétrole et les migrations consécutives qui ont eu lieu à différentes échelles de temps (géologiques à historiques) entre le sous-sol, la proche-surface et la surface (la zone critique qui abrite le sol et la biosphère). L'approche utilisée est basée sur une modélisation thermique de bassin, contrainte par des marqueurs organiques de thermicité mesurés sur des huiles et des roches mères. Les données de géochimie organique des roches mères mésozoïques affleurantes (série pré-rift) sont utilisées pour estimer la paléo-couverture crétacée encore mal quantifiée pour

le Fossé Rhénan. Les corrélations huiles/huiles et huiles/roches mères permettent d'identifier les voies de circulation des hydrocarbures depuis les roches mères jusqu'aux pièges pétroliers. Les circulations des huiles depuis les pièges pétroliers vers la zone critique peuvent se produire à l'échelle des temps géologiques par dysmigration ou à l'échelle des temps actuels au travers des puits pétroliers forés au cours du XX<sup>e</sup> siècle. La composition moléculaire des huiles évolue en réponse aux conditions de transfert et d'altération de ces circulations. Cette évolution est caractérisée en comparant la signature moléculaire initiale des huiles obtenues par maturation artificielle des roches-mères principales à celles des huiles collectées dans les puits et dans les résurgences. Cette étude doit aider à documenter l'histoire de l'enfouissement du Fossé Rhénan, en particulier avant sa mise en place, l'évolution de la distribution de la chaleur dans l'espace et dans le temps, ainsi que les réseaux majeurs permettant la migration des fluides du sous-sol vers la surface.

### Avancées pour 2021

En ce qui concerne les problématiques liées à la génération d'huile et l'histoire pré-rift du Fossé Rhénan, un modèle 1D de thermicité a été construit sur la base de la colonne sédimentaire synthétique du puits Roeschwoog 1 et calibré grâce aux marqueurs de thermicité mesurés sur des échantillons de roches-mères mésozoïques. Les résultats permettent d'estimer l'épaisseur maximale des sédiments érodés avant la mise en place du Fossé Rhénan. Cependant, le modèle proposé ne permet pas de discriminer l'âge de ces sédiments. Pour comprendre si une part de sédiments d'âge Crétacé doit être considérée dans



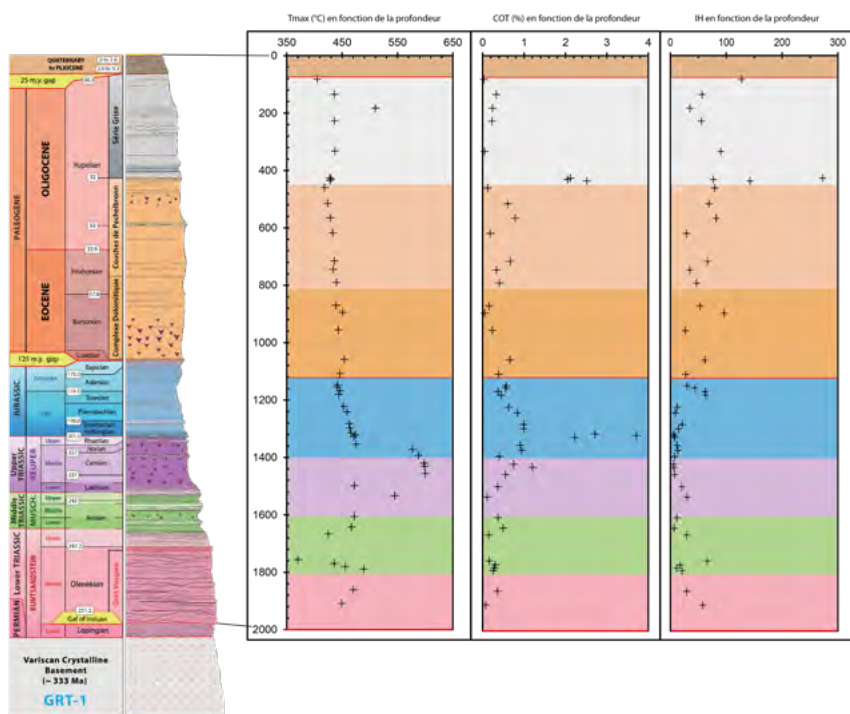
Carte structurale schématique de l'écorché de la base tertiaire du bassin de Pechelbronn, illustrant l'érosion graduelle des dépôts jurassiques (nuances de gris) avant la mise en place du Fossé Rhénan, la localisation des échantillons de roches-mères récoltés dans le champ de fracture de Saverne (étoiles) et la localisation du puits géothermique GRT-1 (croix cerclée) (réalisée à partir de INTERREG IV Upper Rhine Project, Deep Geological Potential of the Upper Rhine Graben, 2007-2013 et Wannesson, 1998).

le secteur de Pechelbronn, l'évolution de son épaisseur depuis l'est du Bassin Parisien vers l'ouest du Fossé Rhénan doit être évaluée. En ce sens, des modèles 1D de thermicité de l'est du Bassin Parisien sont en cours de réalisation.

Afin de reconstruire l'histoire de l'enfouissement du Fossé Rhénan (syn-rift) et l'évolution de la distribution de la

chaleur dans l'espace et le temps, un échantillonnage sur des carottes et des déblais de forage du secteur de Pechelbronn a été réalisé. 10 puits pétroliers historiques ont été échantillonnés à la carothèque du BRGM à Orléans. Un échantillonnage plus conséquent a pu être réalisé sur le puits géothermique GRT1 à la carothèque d'ES-Geothermie à Soultz-sous-Forêts, afin d'établir un profil de maturité continu qui servira de référence pour les autres puits. Les échantillons sont analysés progressivement par pyrolyse Rock-Eval au laboratoire ISTO d'Orléans.

En ce qui concerne les compositions moléculaires des huiles, 15 nouveaux échantillons d'huile ont été collectés dans des piézomètres et des puits pétroliers avec l'aide du service DPSM du BRGM. Les huiles ont été analysées par technique GC/MS sur la plateforme de géochimie organique pour connaître leur composition moléculaire. Pour certaines de ces huiles, les eaux associées ont été échantillonnées. Elles ont été analysées à STEVAL (GeoRessources) pour connaître leur composition élémentaire et au LIEC pour leur teneur en carbone (organique et inorganique) et leur concentration en acides organiques. De plus, 5 échantillons de roches-mères immatures ont été sélectionnés pour reproduire la génération de pétrole par maturation artificielle sur la plateforme d'expérimentation hydrothermale. Les analyses pour obtenir leurs signatures moléculaires sont en cours.



Valeurs Tmax (°C), COT (%) et IH obtenues par pyrolyse Rock-Eval des cuttings du puits géothermique GRT-1 (Rittershoffen, Alsace) en fonction de la profondeur, de l'échelle chronostratigraphique et de la colonne lithologique traversée (modifiées d'après Düringer et al., 2019).

# Jeanne Touche

## Effet de la sécheresse sur le fonctionnement biogéochimique d'un écosystème forestier

Thèse encadrée par Marie-Pierre Turpault (BEF) et Philippe de Donato (GeoRessources)

Dans les prochaines décennies, les écosystèmes forestiers devront faire face à des sécheresses de sols plus intenses et plus fréquentes. Afin de protéger ces écosystèmes qui fournissent de nombreux services environnementaux et socio-économiques, il est primordial d'identifier les impacts générés par ces événements sur le moyen et long terme.

Il existe de nombreuses études sur l'effet des sécheresses sur la forêt, principalement sur l'écophysologie ou la croissance et la mortalité des arbres, liées au cycle de l'eau ou au stockage et au cycle du carbone. Mais on observe un manque d'information sur les interactions entre les événements de sécheresse et la circulation des nutriments dans l'écosystème (aussi appelés cycles biogéochimiques). Or, cette circulation des nutriments est essentielle au bon fonctionnement des forêts et elle peut aussi être impactée par la faible disponibilité en eau en période de sécheresse. La prise en compte des cycles biogéochimiques permettrait une meilleure compréhension de l'impact de la sécheresse sur les écosystèmes forestiers.

En étudiant l'ensemble des cycles biogéochimiques d'un écosystème forestier et les variations de flux associées à des conditions de sécheresses, les principaux objectifs de cette thèse sont :

- D'identifier les perturbations biogéochimiques liées à la sécheresse et au stress hydrique généré,
- D'identifier les risques biogéochimiques (carence, toxicité...) induits par ces perturbations et si un double risque (hydrique et biogéochimique) peut exacerber la vulnérabilité de la forêt à la sécheresse,
- D'émettre des hypothèses et proposer des mesures de gestion pour atténuer la vulnérabilité des arbres et ces risques biogéochimiques liés à la sécheresse.



Pour atteindre ces objectifs, la stratégie de recherche repose à la fois sur de l'expérimentation et de l'observation. La grande majorité des recherches sont réalisées sur le site expérimental de Montiers-sur-Saulx, dans le département de la Meuse. Cette thèse ne traite que d'une seule essence, qui est le hêtre européen (*Fagus sylvatica*), l'un des feuillus les plus abondants dans les forêts tempérées européennes.

Dans le cadre de cette thèse, un premier article a été publié en janvier 2022 sur l'effet de cinq années de sécheresse expérimentale intense et répétée sur la croissance et l'état de santé des arbres et la concentration en nutriments dans les différents compartiments d'une hêtraie mature.

 **LIRE SA PUBLICATION**  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119987>

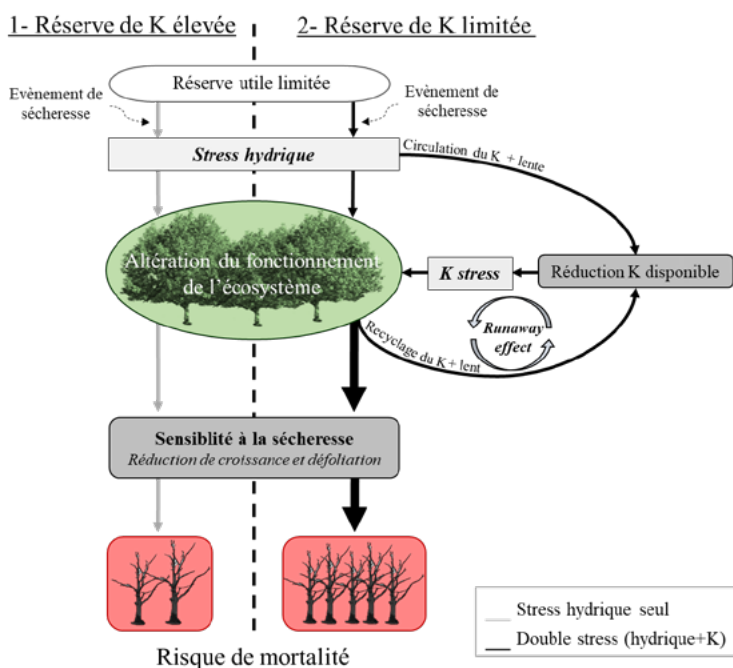
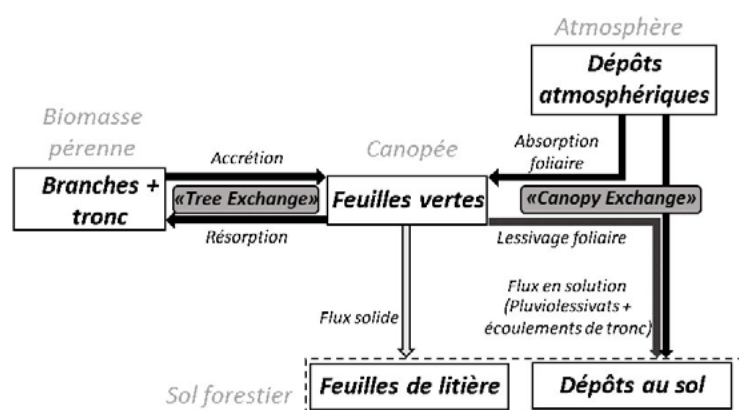




Photo : Jacques Pironon

Au bout de cinq ans, les résultats montrent une diminution de 50 % de la croissance et une forte détérioration de l'état de santé de la moitié des arbres. Concernant la concentration en nutriments, l'élément le plus affecté est le potassium, car sa teneur diminue dans tous les compartiments étudiés et une carence en K est observée. Cinq années de sécheresse consécutives sur des sols calcaires aux réserves limitées en eau et en K ont induit un double stress hydrique et nutritif, qui est la cause probable d'une augmentation de la sensibilité des arbres à la sécheresse et d'une augmentation du risque de mortalité (voir figure précédente).



compenser la faible absorption de N par les racines pendant la sécheresse et ainsi éviter une carence. Dans le même temps, la dynamique du retour au sol des éléments solubles K et P est modifiée, car ils restent sous forme solide dans les feuilles de litière en raison de la diminution du lessivage foliaire. Cela provoque une libération retardée de K et de P dans la solution du sol et cette libération est ensuite fortement dépendante de la minéralisation de la litière et de la capacité d'absorption des racines des arbres (qui peuvent être faibles pendant la sécheresse). Comme les épisodes de sécheresse sont appelés à devenir de plus en plus fréquents et intenses, cela pourrait entraîner une baisse de K et de P dans les arbres et une carence potentielle en nutriments, comme cela a été observé dans la première étude, pour le K.



Afin de limiter l'impact des sécheresses futures sur ce type d'écosystème sensible, les gestionnaires forestiers pourraient envisager une fertilisation en K et/ou une gestion rationnelle et efficace en K.

Un deuxième article est en cours de rédaction et traite des impacts liés à des événements de sécheresse naturelle sur les échanges, les stocks et les flux d'éléments majeurs au sein de la canopée (voir figure ci-dessous).

Cet article met en évidence des conséquences positives et négatives de tels événements. En effet, une meilleure efficacité de résorption du N a été mesurée et peut être identifiée comme une adaptation à court terme, pour

### Financement supplémentaire 2022

Thèse commencée en octobre 2019 et prolongée d'une année (30 septembre 2023) en raison de la crise sanitaire.

# Mohammad Iktiham bin Taher

## New HEMT based gas sensors for in-situ bio-géochimical analysis

Thèse encadrée par Jacques Pironon (GeoRessources) et Simon Gauthier (Institut Lafayette)

Dans le cadre du projet DEEPSURF, trois sociétés privées (Institut Lafayette, Solexperts et 45-8 Energie) et un établissement public (laboratoire GeoRessources, Université de Lorraine - CNRS) mènent conjointement une recherche approfondie selon une méthodologie très itérative afin de développer une nouvelle génération de capteurs de gaz basés sur des transistors AlGaIn/GaN à haute mobilité électronique (HEMT) pour des environnements géologiques complexes. Pour y parvenir, un développement continu des étapes technologiques pour la conception de l'agencement des capteurs, la fabrication et l'optimisation des performances électriques du HEMT est en cours à l'Institut Lafayette. De plus, des progrès continus ont été réalisés dans la caractérisation de l'hétérostructure AlGaIn/GaN vers un capteur de gaz sensible et sélectif ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  et He). Le point clé du projet repose sur la complémentarité des techniques utilisées pour comprendre les mécanismes de détection des gaz impliqués et le caractère innovant associé à la corrélation attendue entre les propriétés physiques déterminées au niveau du matériau, l'identification de l'interaction du gaz et l'optimisation et le contrôle des conditions de dépôt des couches de détection de gaz du dispositif.



### Rapport d'activité

Plusieurs conceptions de capteurs HEMT AlGaIn/GaN avec plusieurs modèles de micro-éléments chauffants intégrés ont été fabriqués pour optimiser les performances des capteurs de gaz car ils affectent directement le courant de drain de sortie (IDS) et la transconductance (gm) du transistor.

Ces capteurs sont caractérisés en continu dans plusieurs bancs d'essais à température, pression et humidité contrôlées qui ont été mis en place en laboratoire pour imiter les environnements souterrains réels. Le gaz de test avec une concentration et un débit connus est fourni via un système de mélange de gaz contrôlé par ordinateur avec des régulateurs de débit massique.

Les capteurs fabriqués ont d'abord été testés pour la détection de  $H_2$  en utilisant différentes couches fonctionnelles (Pt, ITO et IZO). La réponse au gaz a été testée à des températures de 50 à 300 °C et les capteurs ont montré des caractéristiques de détection prometteuses dans la plage de concentration de 25 à 20 000 ppm sous  $N_2$  et air synthétique. L'augmentation de la température à 200 °C a considérablement amélioré la réponse, la récupération et la variation du signal en présence et en l'absence de gaz  $H_2$ .

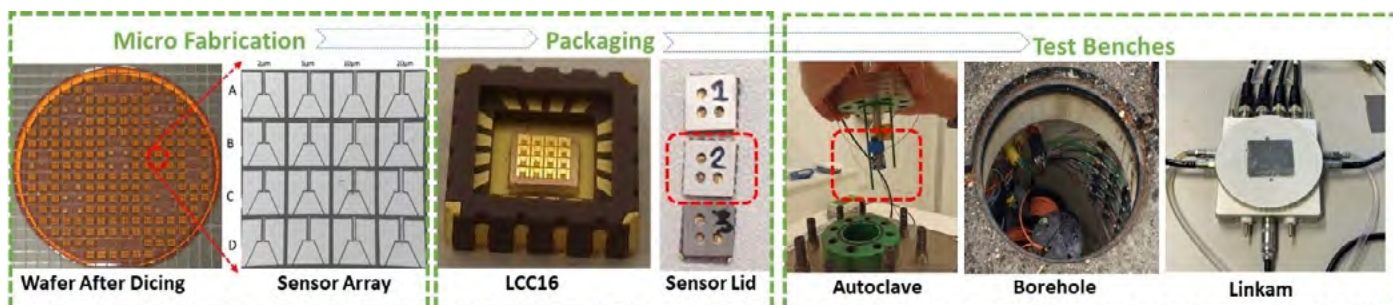


Figure 1: micro fabrication de capteurs de gaz HEMT, emballage, et caractérisation dans le laboratoire (Autoclave et Linkam) et dans de réelles conditions souterraines (puits : 51 mètres de profondeur)

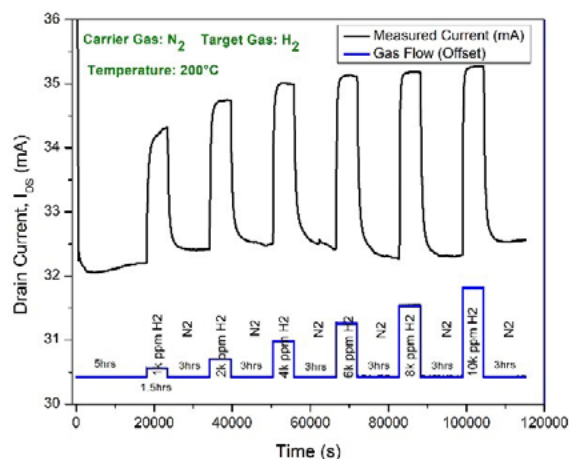
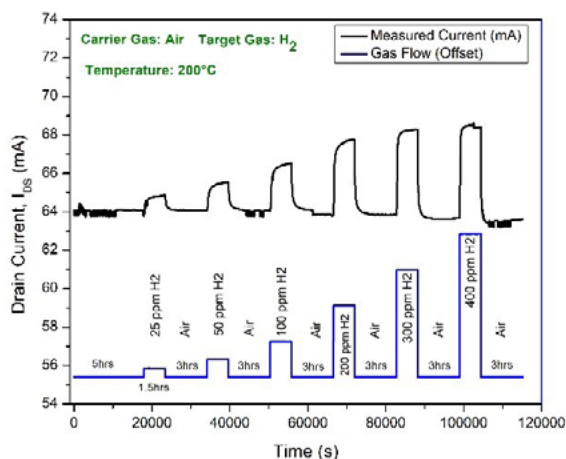


Figure 2: (a) Réponse du capteur Pt/AlGaIn/GaN à 200°C pour différentes concentrations de H<sub>2</sub> (a) 25 ppm à 400 ppm H<sub>2</sub> sous air (b) 1000 ppm à 10000 ppm H<sub>2</sub> sous N<sub>2</sub>

Comme le montre la figure 2, le courant augmente lorsque le capteur est exposé à différentes concentrations de H<sub>2</sub> et récupère lorsque l'alimentation en H<sub>2</sub> cesse tout en maintenant une alimentation en air/N<sub>2</sub> sec.

Le capteur a également montré une sélectivité pour surveiller le H<sub>2</sub> parmi d'autres gaz tels que le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>, et des caractéristiques satisfaisantes pour assurer la détection de l'hydrogène gazeux naturel souterrain.

La stabilité à long terme a été confirmée par des tests de réponse reproductibles sur une période de 6 mois, et aucune dégradation significative du signal n'a été observée.

Les réponses des gaz CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> ont été obtenues en modulant l'accès à la couche fonctionnelle du HEMT AlGaIn/GaN. Les paramètres de dépôt et la conception de la couche fonctionnelle ont été optimisés pour obtenir une meilleure réponse transitoire pour les capteurs de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>. Nous prévoyons qu'avec des fonctionnalités encore optimisées, ces capteurs offriront de nouveaux degrés de liberté pour l'analyse des gaz, car la plupart des capteurs de gaz à base de GaN signalés à ce jour sont utilisés pour la détection d'hydrogène.

Questions de recherche et autres développements envisagés pour la fin de thèse : chauffage au niveau de la puce, élimination des influences externes sur le capteur telles que la température et l'humidité. Enfin, de nombreux

autres HEMT GaN sont à l'étude avec une variété de couches de détection qui peuvent être combinées sur une seule puce pour former un détecteur de gaz performant.



Sampling site near Lac Abbé, Djibouti



## Carolina Dantas Cardoso

Traçage isotopique des fluides crustaux  
par l'utilisation des gaz rares - de  
la profondeur vers la surface

Thèse encadrée par Raphaël Pik (CRPG) et Antonio  
Caracausi (INGV\_Université de Palerme)

Les gaz rares (ou nobles) sont de puissants outils de traçage des fluides dans la croûte en raison de leur comportement chimique inerte due à l'existence d'une couche électronique extérieure saturée. Les systèmes isotopiques des gaz rares légers - hélium et néon ( $^3\text{He}/^4\text{He}$  et  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ) - varient de plusieurs ordres de grandeur entre les réservoirs atmosphérique, crustal et mantellique. Ce sont donc les traceurs isotopiques les plus efficaces du mélange entre ces réservoirs au sein des fluides crustaux car ils fournissent des informations sur les sources de fluides initiales tandis que les éléments et les isotopes stables sont sensibles aux processus chimiques dus aux interactions eau-roche. Les gaz rares de l'atmosphère, du manteau et de la croûte peuvent être dissous dans des

proportions différentes dans les eaux souterraines, et les phases gazeuses ainsi quantifiées peuvent nous donner des informations sur leurs interactions. Ceux produits par la désintégration radiogénique dans la croûte peuvent nous renseigner sur le temps de séjour des eaux souterraines. Ils sont utilisés pour retracer l'histoire et les mélanges entre les fluides crustaux, que ce soit pour (i) les systèmes aquifères ou (ii) les systèmes hydrothermaux naturels associés aux volcans, aux zones sismiques et aux sites géothermiques. Ils ont également été utilisés comme traceurs potentiels dans le cas de transferts de surface induits par l'exploitation anthropique du sous-sol, comme pour des études pilotes de stockage de  $\text{CO}_2$ .

Le projet initial était axé sur la surveillance à haute résolution de  $^3\text{He}/^4\text{He}$  et  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  dans les eaux souterraines des régions volcaniques et sismogènes, cependant, en raison des complications de la crise sanitaire, le projet a été recentré sur l'étude des relations entre le gaz, l'eau, et le transfert vertical de chaleur vers la surface dans les zones géothermiques ou les zones de failles avec dégazage. Nos zones cibles actuelles se situent en Islande, à Djibouti et en France.

En Islande, nous étudions une région sismogène dans le nord où nous nous attaquons au transfert de chaleur et au dégazage magmatique dans les zones hors rift pour identifier les sources et la systématique hydrologique. Notre recherche appliquée aux systèmes d'eaux souterraines est double : un monitoring des rapports  $^3\text{He}/^4\text{He}$  et  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  et une étude régionale de  $^3\text{He}/^4\text{He}$  et  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ , éléments majeurs et traces. Les résultats préliminaires de notre surveillance hebdomadaire du forage HA-01 de juin 2020 à mars



Hot spring in our survey area in North Iceland



Sampling station during well test in Nièvre, France

2021, peu de temps après un essaim de tremblements de terre d'une magnitude allant jusqu'à six, montrent une légère augmentation de  $^3\text{He}/^4\text{He}$  et  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  par rapport aux données de base sur la période de 2015-2016 où aucun tremblement de terre de  $M > 4$  n'a été enregistré. Par rapport aux valeurs de référence, les données de surveillance semblent former une tendance plus éloignée de la composante atmosphérique le long de la ligne de mélange entre les réservoirs atmosphériques et mantelliques (Fig. 1). Ces résultats ont été présentés lors de la conférence Goldschmidt 2021. Notre enquête régionale élargit l'ensemble des données de la littérature qui se concentrait auparavant sur la zone de rift active ; la zone hors rift où nous avons échantillonné montre une large gamme de rapports  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (4 - 18 Ra) y

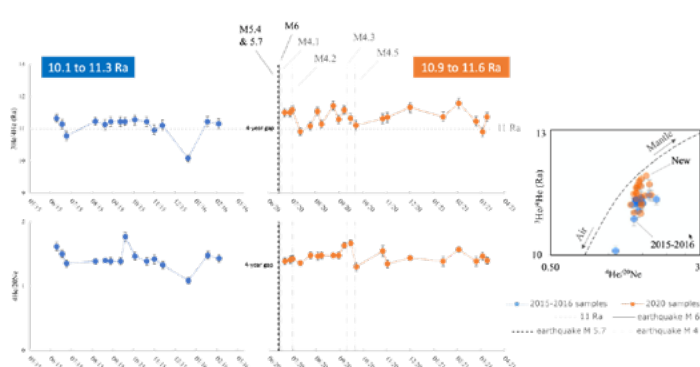


Fig 1. Séries chronologiques de  $^3\text{He}/^4\text{He}$  et  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  montrant les données de base de 2015-2016 en bleu et nos données de surveillance en orange. Les deux ratios affichent une augmentation globale par rapport aux valeurs de référence. A droite, les données de suivi en orange affichant une tendance plus éloignée de la composante air. Site d'échantillonnage près du lac Abbé, Djibouti Source chaude dans notre zone d'étude au nord de l'Islande Station de prélèvement lors d'essais de puits dans la Nièvre, France.

compris des valeurs élevées non attendues dans une région volcaniquement inactive. Les ratios trouvés dans les systèmes volcaniques de Krafla et Theistareykir ne dépassent pas 11 Ra. Il existe deux possibilités pour expliquer les rapports  $^3\text{He}/^4\text{He}$  élevés trouvés dans la zone hors rift - soit par transport d'eau depuis les régions volcaniques des hautes terres où les rapports  $^3\text{He}/^4\text{He}$  atteignent 26 Ra, soit par transfert de chaleur vertical à partir du dégazage magmatique le long d'anciennes failles. Cependant; pour le premier cas, on ne connaît pas l'architecture exacte des systèmes aquifères qui pourraient ne pas être un modèle multicouche traditionnel comme on le voit dans les bassins sédimentaires ; pour le second cas, il faudrait identifier la source du dégazage ce qui n'est pas simple vu que nous sommes dans des zones inactives.

En France, nous étudions des sources froides avec dégazage associé dans une zone de faille dans la Nièvre afin de tracer la source du gaz dans le réservoir par des analyses de gaz rares et d'isotopes stables. Nous avons également surveillé un test de puits en mesurant  $^3\text{He}/^4\text{He}$  et  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  afin de détecter d'éventuelles perturbations dans le système. Les résultats préliminaires montrent qu'il n'y a pas eu de variations significatives pendant le test du puits et que la source des fluides est principalement crustale avec une certaine contribution du manteau ou de la production locale de  $^3\text{He}$  nucléogénique en raison de la présence hypothétique de quantités anormalement élevées de Li dans le bassin local.

A Djibouti, nous avons prélevé du gaz et de l'eau de sources chaudes et froides près du Lac Abbé pour caractériser le système géothermique dans le cadre du projet LEAP-RE « Village Géothermique ». Les analyses sont toujours en cours.

# Émilio Abi Aad

## Modélisation physique et numérique de la stabilité des ouvrages souterrains

Thèse encadrée par Olivier Deck (GeoRessources) et Marianne Conin (GeoRessources)

L'objectif principal de cette thèse est de comprendre le comportement mécanique d'un massif rocheux soumis à des sollicitations mécaniques. Notre objectif, à terme, est de modéliser une exploitation minière creusée dans un massif rocheux discontinu, en utilisant une modélisation physique. Ce type de modélisation permet d'obtenir des résultats quantitatifs en complément de la modélisation numérique. Néanmoins, la transposition des résultats de l'échelle réduite à l'échelle du prototype nécessite de respecter les facteurs d'échelle.

L'originalité de ce travail consiste à développer une méthode innovante, basée sur les techniques d'impression 3D (Binder Jetting) combinant du sable et un liant phénolique, pour simuler un massif rocheux, caractérisé par des joints rocheux répartis aléatoirement et aux propriétés mécaniques et géométriques contrôlées. L'utilisation de cette technique peut permettre la réalisation de modèles réduits discontinus de géométrie très précise et reproductibles.

Tout d'abord, des essais de compression uni-axiaux, tri-axiaux, et de flexion trois points sont réalisés pour caractériser le comportement mécanique de ce matériau (impression 3D). Les résultats montrent que le comportement mécanique de ce matériau dépend fortement du taux de saturation du liant (W), du taux d'humidité (E), et de la direction de l'impression (Figure 1), et que ce dernier permet également de simuler une roche intacte anisotrope de faible résistance et rigidité.

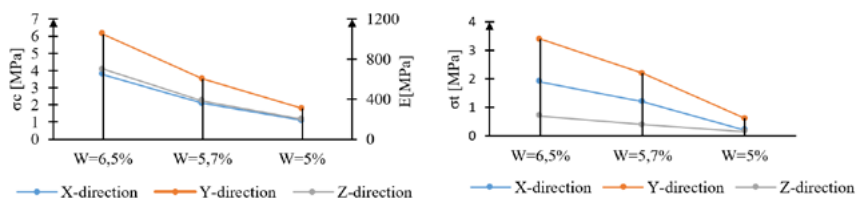


Figure 1. Résistance à la compression ( $\sigma_c$ ) et à la traction ( $\sigma_t$ ), et le module d'Young (E) des éprouvettes 3DP en fonction de la teneur en liant (W)

Ensuite, avant d'étudier la faisabilité de la production d'un massif rocheux artificiel par impression 3D (Figure 2), il est nécessaire d'étudier le comportement d'un seul joint artificiel (Figure 3).

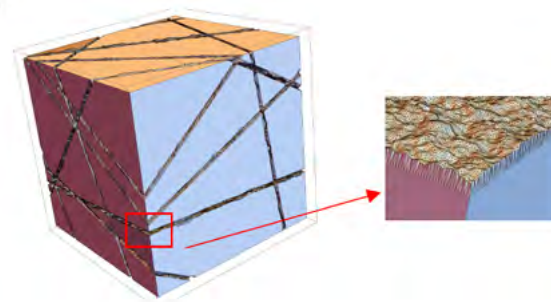


Figure 2 a) Un massif rocheux simulé numériquement avec une répartition aléatoire des fractures, b) un joint rocheux rugueux généré numériquement.

La morphologie des joints étudiés est assimilée à une surface fractale avec une réplification auto-affine, conformément aux observations sur des discontinuités naturelles. Plus de 40 essais de cisaillement direct sur différentes surfaces rugueuses, fractales simulées numériquement sont réalisés. Les résultats révèlent trois comportements en fonction de la contrainte normale appliquée :

- À faible contrainte normale, environ 10 % de la valeur de la résistance à la compression du matériau ( $\sigma_c$ ), les



Figure 3 a et b) Éprouvettes de cisaillement imprimées avant cisaillement à l'aide de la technique « Binder Jetting » c) éprouvette après cisaillement

aspérités de plus grande longueur d'onde provoquent une dilatance (ouverture du joint) ;

- À une contrainte normale égale à 35 % de la valeur de  $\sigma_c$ , des fissures de traction et/ou de glissement sont observées dans et sous les aspérités de plus grande longueur d'onde, accompagnées par l'écrasement des aspérités et la déformation plastique de la matrice, conduisant à une fermeture du joint ;
- À une contrainte normale intermédiaire égale à 25 % de la valeur  $\sigma_c$ , les deux mécanismes sont observés conjointement. Il est à noter que les petites aspérités sont endommagées dans les trois cas. Ces mécanismes ont déjà été identifiés sur des fractures naturelles. De plus, il est constaté que la dilatance de ces joints est contrôlée par les aspérités de plus grande longueur d'onde.

Finalement, dans le but de développer une procédure d'interrogation de capteurs de contrainte et de déformation, encastrés dans la matrice réalisée par impression 3D, et d'étudier l'effet des discontinuités sur la distribution des champs de contraintes et déformations dans un massif rocheux explicitement discontinu, six essais de compression uni-axiale sont réalisés sur des éprouvettes imprimées en 3D, dans lesquelles des fibres optiques ont été intégrées en deux configurations différentes : 1- longitudinale afin de mesurer les déformations axiales (Figure 4); 2- transversale afin de mesurer les déformations transversales. Les résultats montrent un intérêt important de cette technique mise en œuvre en collaboration avec les sociétés Solexperts et Platinum 3D.

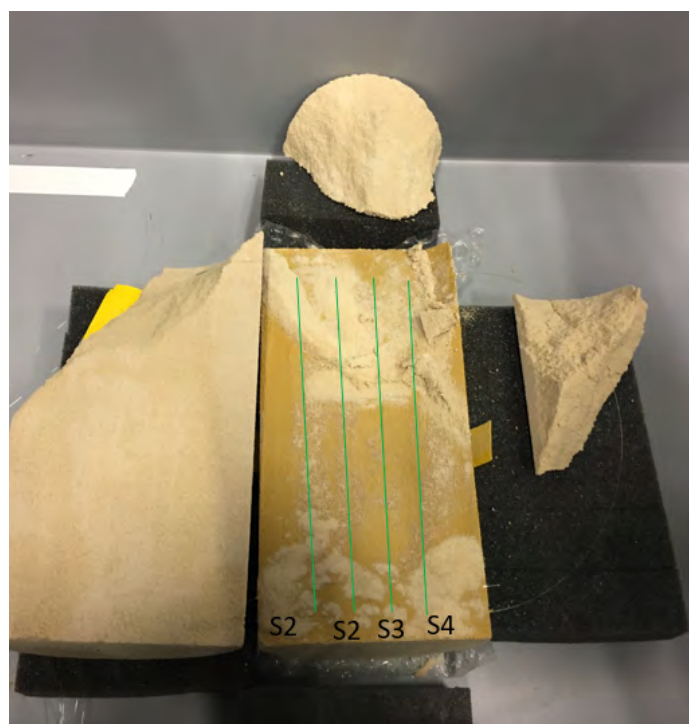


Figure 4 Fibre optique (lignes vertes) intégrée dans les éprouvettes 3DP (configuration longitudinale)

### Financement supplémentaire

Le financement complémentaire demandé a pour objectif de permettre d'étudier différentes stratégies d'intégration de capteurs dans des modèles réduits d'ouvrages discontinus réalisés en fabrication additive sable. Différentes stratégies seront étudiées : intégration des capteurs pendant le processus d'impression ou après l'impression. Différentes technologies d'acquisitions sont également testées : capteur de pression, jauges de déformations, fibre optique.

# Rouba Alrammouz

Capteurs de gaz HEMT : He, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>

Post-doctorat encadré par Mathieu Lazerges (Université Paris Descartes / GeoRessources) Simon Gauthier (Institut Lafayette) et Thomas Guermont (45\_8 Energy)

Co-financement 45\_8 Energy et Institut Lafayette



## Réalisation d'un banc de calibration à humidité, concentration en gaz et température contrôlées

Pour les besoins de l'étude, un banc d'essai de calibration de laboratoire des capteurs HEMT (Fig. 1) a été développé en collaboration avec l'Institut Lafayette. Ce banc d'essai permet de simuler des conditions de terrain en termes d'humidité (0 à 95 % d'HR), de concentration en gaz d'intérêt (5 à 2000 ppm d'H<sup>2</sup>) et de température (0 à 60°C). Ce système est composé de deux éléments principaux : un mélangeur de gaz à humidité contrôlée et une série de 5 enceintes en acier inox 316 L de volume 135 mL étanches au gaz.

Le premier ensemble est principalement constitué de plusieurs débitmètres massiques gaz et liquide et permet l'injection continue de gaz de calibration à concentration et humidité maîtrisées (@Bronkhorst) à un débit de 0 à 500 mL/min. Le concept repose sur l'injection de microgouttelettes d'eau par une vanne spécialement dédiée qui, au contact du mélange de gaz généré par les débitmètres gaz imposera un environnement de mesure humide aux capteurs HEMT.

Les enceintes de calibration (@AdvisionTech) ont été usinées pour permettre l'intégration des capteurs tout en assurant une étanchéité au gaz avec l'extérieur. Elles sont composées d'une double enveloppe pour la circulation d'un fluide caloporteur assurant la régulation de température du système. Plusieurs capteurs (température, pression et humidité) sont installés dans les enceintes afin de mesurer les paramètres imposés de calibration.

Enfin, des électrovannes ont été mis en place à des endroits stratégiques pour une utilisation flexible d'une ou de plusieurs enceintes.

## Performances analytiques de détection de gaz

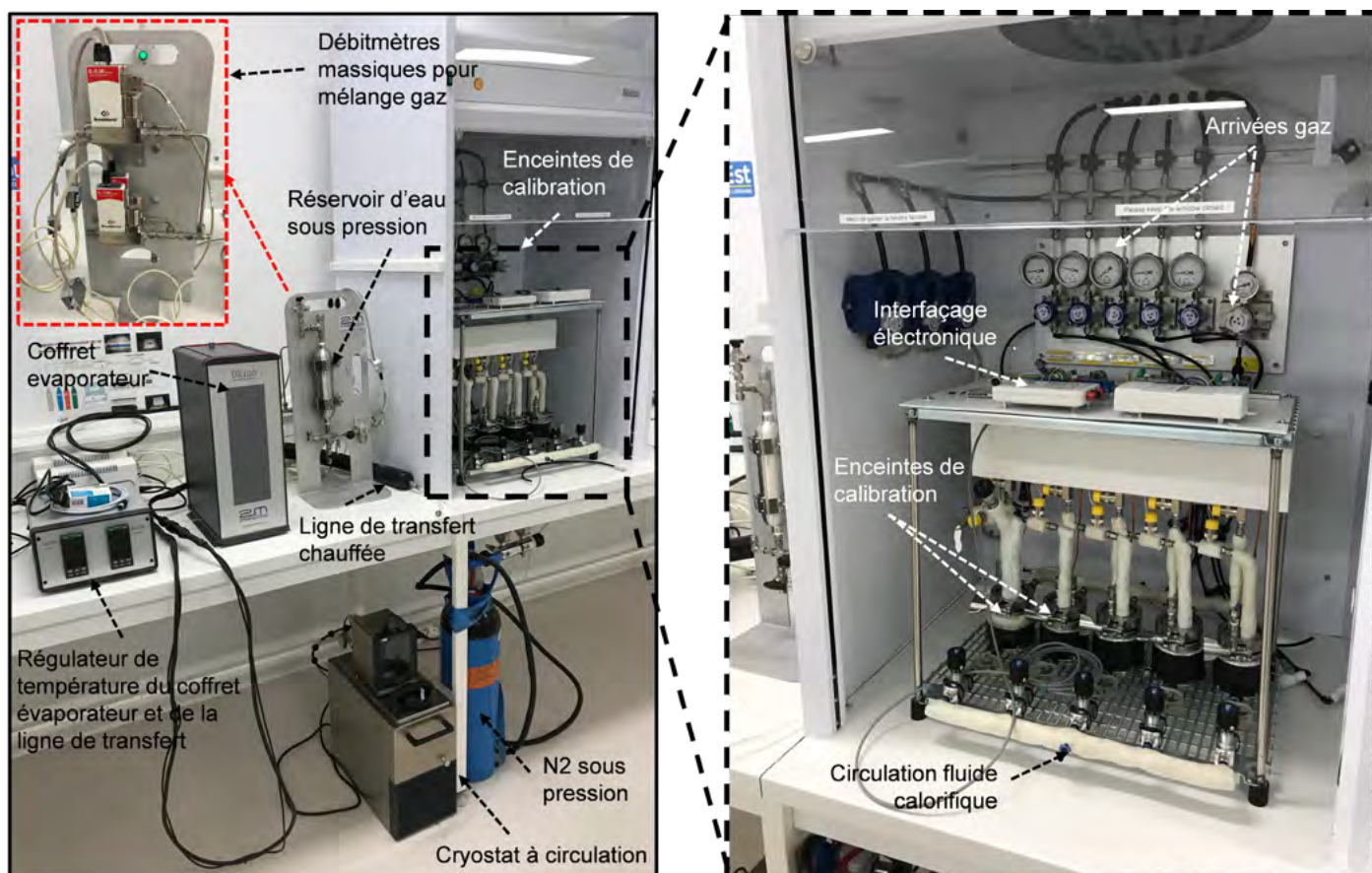
Des capteurs d'hydrogène ont été réalisés et testés en laboratoire. Trois métaux ont été utilisés pour réaliser ces capteurs : l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO), l'oxyde d'indium dopé au zinc (IZO) et le platine. Une étude thermodynamique et cinétique complète de l'adsorption de l'hydrogène sur ITO et IZO a été menée, ces deux métaux présentent des performances analytiques satisfaisantes en termes de dynamique de réponse et de signal pour détecter l'hydrogène. Les conditions optimales de mesure en termes de protocole d'acquisition du signal et de température ont été dégagées et un article sur ces travaux sera soumis à un journal de rang A de l'American Chemical Society très prochainement<sup>[1]</sup>. Une étude analogue sur la détection de l'hydrogène sur platine est en cours de finalisation. Concernant la détection d'hélium sur oxyde de vanadium (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) qui est largement plus difficile que celle de l'hydrogène sur platine, un état de l'art préliminaire et complet de l'utilisation du V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pour la détection de gaz a été rédigé et accepté comme article dans un journal scientifique de rang A : Sensors and Actuators<sup>[2]</sup>.



LIRE SA PUBLICATION

<https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113179>





Le banc d'essai est entièrement commandé via une interface Labview qui permet le lancement de séquences de calibration de façon totalement autonome. Sa confection a bénéficié de l'expertise technique de A. Randi (GeoRessources) et Y. Halfaya (Institut Lafayette).

<sup>[1]</sup> Thermodynamics and kinetics of Hydrogen adsorption onto ITO and IZO, Rouba Alammouz, Iktiham Bin Taher, Yves Sama, Jacques Pironon, Tarik Moudakir, Mathieu Lazerges, Aurélien Randy, Yacine Halfaya, Simon Gautier\*, Langmuir, 2022, à soumettre.

<sup>[2]</sup> Vanadium pentoxide gas sensors: a review, R. Alammouz\*, M. Lazerges, J. Pironon, A. Randi, Y. Halfaya, S. Gautier, Sensors and Actuators A, 2021, v332, p1-24.

# Amélie Cavelan

Impact des battements de nappes phréatiques liés au changement climatique sur la remobilisation des hydrocarbures pétroliers (LNAPLs)

Post-doctorat encadré par Pierre Faure-Catteloïn (LIEC) et Fabrice Golfier (GeoRessources)

Co-financement BRGM

Les LNAPLs (Light Nonaqueous Phase Liquids) représentent une source importante de contamination des sols et des eaux souterraines. Ces hydrocarbures pétroliers de faible densité peuvent s'infiltrer au travers de la zone non saturée des sols, jusqu'à s'accumuler au-dessus de la nappe phréatique sous la forme d'une phase pure. Si leur remobilisation vers la nappe et l'atmosphère est limitée dans le cas d'une nappe « stagnante », les battements saisonniers (ou induits par pompage) du niveau de la nappe peuvent entraîner l'étalement et le mélange vertical des LNAPLs au niveau de la frange capillaire des sols. Cela augmente les surfaces d'échange des LNAPLs avec les phases gazeuses/liquides, favorisant de ce fait leur relargage. Dans les prochaines décennies, l'intensité des battements de nappe devrait s'accroître sous l'effet du changement climatique (modifications du comportement des nappes en lien avec les changements de fréquence et de l'intensité des précipitations) et l'utilisation croissante des ressources en eaux souterraines. Ce phénomène devrait influencer les mécanismes de relargage des LNAPLs dans l'environnement et impacter la qualité des eaux souterraines, des sols et de l'air sur les sites contaminés.

Ce projet a donc deux objectifs majeurs :

- Comprendre comment l'intensité des variations piézométriques impacte les mécanismes de relargage des LNAPLs dans l'environnement dans le contexte du changement climatique ;
- Évaluer et comparer la capacité des différentes méthodes de suivi de la distribution des saturations en LNAPL utilisées sur les sites contaminés (mesures piézométriques, sondes in-situ).

Dans ce but, deux colonnes lysimétriques de 2 m<sup>3</sup> de sol conçues pour contrôler l'intensité des battements de nappe et permettant un suivi géophysique indirect (conductivité électrique), physico-chimique in-situ (pH, Eh, température) et géochimique ont été artificiellement contaminées par 50 L de LNAPL (gasoil) en octobre 2021. Ces colonnes, installées à la station expérimentale du GISFI, sont soumises à un scénario de précipitations et d'intensité



Station lysimétrique du GISFI, Homécourt.

de battement de nappe : l'un basé sur les chroniques climatiques régionales et l'autre sur les prévisions les plus extrêmes du GIEC (Fig.1). L'élaboration de ces scénarios repose sur le travail de synthèse bibliographique mené depuis 2020 et qui a abouti à une publication en septembre 2021.

 **LIRE SA PUBLICATION**  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150412>

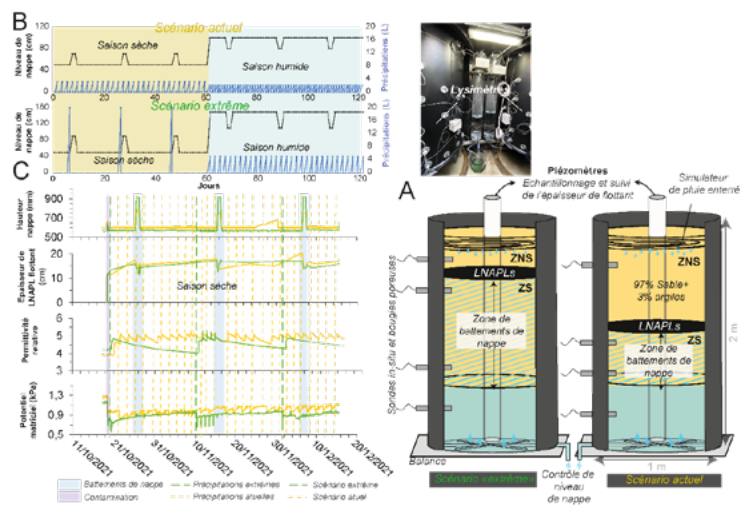


Figure 1. A) Schéma des colonnes lysimétriques instrumentées. B) Scénarios climatiques appliqués sur le dispositif expérimental. C) Exemple d'évolution des paramètres physico-chimiques du sol mesurés par les sondes in-situ lors de la première saison sèche suivant la contamination.

Les travaux de cette année ont aussi permis de résoudre les problèmes techniques rencontrés sur le dispositif depuis fin 2020 et de préparer dans les meilleures conditions la contamination des dispositifs et le lancement du suivi. En parallèle, des expériences de traçage hydrogéologiques et des travaux de modélisation numérique ont été réalisés afin de déterminer au mieux les propriétés hydrologiques



Mise en place du traçage hydrologique au GISFI

du sol utilisé sur les colonnes et leur comportement au cours des scénarios de précipitation. Depuis la mise en place du polluant, la quantité et la nature des relargages vers la phase gazeuse, dissoute et pure (analyses  $\mu\text{GC}$ , GC/MS, COD deux fois par mois) et la distribution de la saturation en LNAPLs (sondes TDR, permittivité et résistivité électrique en continue) dans les lysimètres ont été analysés et comparés.

Les résultats issus de ces premiers mois de suivi confirment le bon fonctionnement du dispositif qui permet de suivre l'évolution des propriétés physicochimiques du sol et de l'épaisseur de LNAPL flottant au toit de la nappe en fonction des scénarios climatiques (Fig.1). On constate notamment une baisse de l'épaisseur de LNAPL flottant au toit de la nappe dans les piézomètres lors des battements de nappe, suggérant un étalement des polluants à travers la zone de battement. Cet étalement semble favoriser la remobilisation du LNAPLs vers la phase gazeuse comme

en témoigne l'augmentation des émissions de LNAPLs sous forme gazeuse dans l'air au-dessus des lysimètres lors de la contamination et des battements de nappe (Fig.2). Plusieurs semaines après la contamination, la colonne soumise au scénario le plus extrême émet davantage de composés gazeux issus du LNAPL lors des battements suggérant une remobilisation plus importante du LNAPL vers la phase gazeuse dans les conditions du changement climatique. La nature des gaz émis semble également commencer à différer entre les colonnes deux mois après la contamination. Les analyses des eaux (phase dissoute) et le traitement des données géophysiques (résistivité) sont actuellement en cours et devraient prochainement aboutir à une meilleure compréhension de l'effet de l'intensité des battements de nappes sur la distribution des LNAPLs dans le sol et leur processus de dissolution. La calibration en laboratoire des sondes TDR et de permittivité en fonction des teneurs en eau/air et LNAPLs auront pour objectif prochain d'estimer plus précisément via les sondes in-situ les variations de la saturation du sol en LNAPL au cours des deux scénarios climatiques. Ces données devraient permettre d'aboutir à une publication prochaine.

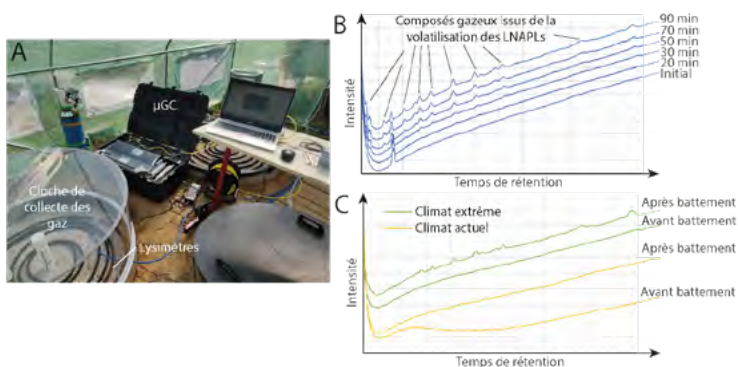


Figure 2. A) Dispositif de collecte et d'analyse les gaz émis des lysimètres lors de la phase contamination et des augmentations du niveau piézométrique. B) Chromatogrammes des gaz prélevés sur les lysimètres de 0 à 1h30 après la contamination au gasoil. On constate une augmentation de la concentration des gaz au cours du temps. C) Chromatogrammes des gaz prélevés sur les lysimètres avant et après une augmentation du niveau piézométrique.

### Financement supplémentaire

Le suivi des dispositifs utilisés pour le projet a subi plusieurs défaillances techniques. À cause de la prolongation des restrictions sanitaires, les techniciens allemands n'ont été autorisés à venir en France pour changer ce dispositif qu'en juillet 2021 retardant ainsi de sept mois le lancement du planning de suivi. Au vu du retard pris en raison des restrictions sanitaires et des délais incompressibles des expérimentations en cours, les fonds supplémentaires ont pour objectif de prolonger le post-doctorat d'Amélie Cavelan, afin qu'elle puisse mener à bien ses travaux jusqu'à la fin du suivi (décembre 2022) et assurer la continuité avec les deux autres projets à venir.

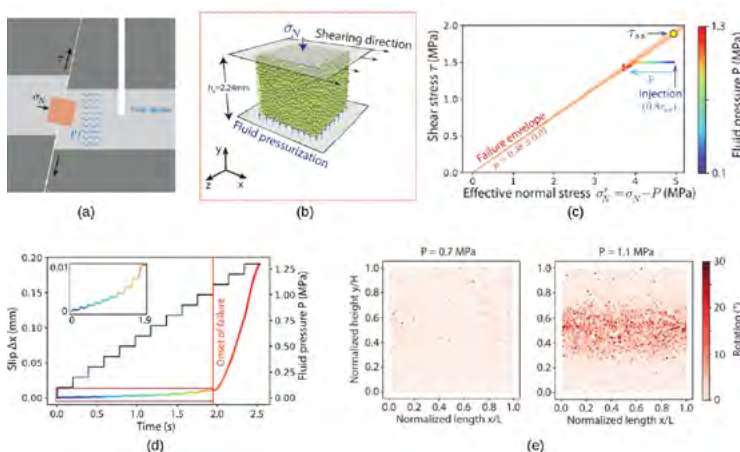


## Hien Nguyen

Comportement hydro-mécanique des failles dans le contexte du stockage géologique du CO<sub>2</sub>

Post-doctorat encadré par Luc Scholtès (GeoRessources)

J'ai consacré mon projet de post-doctorat à l'étude du comportement hydro-mécanique des failles à travers une approche de modélisation numérique dite « aux éléments discrets ». Plus précisément, j'ai cherché à caractériser les mécanismes prenant place au sein d'une gouge de faille lorsque celle-ci est soumise à une sollicitation hydraulique semblable à celle pouvant être induite par toute activité impliquant l'injection de fluides dans le



*Modélisation numérique micromécanique de la réactivation hydraulique d'une faille : a) faille à proximité d'un puits d'injection, b) modèle numérique de la gouge de faille, c) mise en rupture par augmentation progressive de la pression interstitielle au sein d'une gouge initialement stable, d) glissement macroscopique en fonction de la pression interstitielle, e) rotation cumulée des grains au sein de la gouge respectivement avant et après la rupture.*

sous-sol comme, par exemple, le stockage géologique de CO<sub>2</sub>, ou encore, la géothermie profonde. En effet, il est maintenant bien admis que les surpressions de fluides sont à l'origine d'une grande partie des déformations enregistrées le long des failles et que celles-ci peuvent avoir des conséquences parfois dramatiques (cf. activité sismique liée aux opérations de stockage de CO<sub>2</sub> dans les champs pétrolifères du Texas ou encore celle associée aux opérations de géothermie profonde en Alsace ou en Suisse).

Mon objectif était ainsi de reproduire numériquement ces phénomènes et de les étudier à travers une approche multi-échelle couplant observations macroscopiques et micromécaniques.

Pratiquement, j'ai simulé la réactivation hydraulique d'une gouge de faille formée d'un matériau granulaire modèle initialement stable, et j'ai développé des outils d'analyse permettant de caractériser son comportement macroscopique à travers l'observation des mécanismes se développant à l'échelle de ses grains.

J'ai ainsi pu montrer que la stabilité du glissement d'une faille sollicitée hydrauliquement est directement liée au mode de déformation de sa gouge : le glissement est stable en phase sous critique tant que la déformation est répartie sur l'ensemble du squelette granulaire (glissement lent dit de « fluage » associé à une déformation dite de « bulk »), et il devient instable en phase critique à partir du moment où les déformations se localisent sous la forme d'une bande de cisaillement au sein de laquelle les grains se mettent en mouvement (en rotation notamment). À partir du moment où la bande de cisaillement est créée au sein de la gouge, elle agit comme un tapis roulant et entraîne un glissement rapide de la faille et la mène vers sa rupture. On peut noter que le passage d'un mode de déformation à l'autre est, d'après nos simulations, très bien décrit par le critère de Coulomb.



**LIRE SA PUBLICATION**

<https://doi.org/10.1029/2021GL093222>



# Romain Hemelsdaël

## Évolution structurale et sédimentaire du bassin sarro-lorrain (Carbonifère-Permien)

Post-doctorat encadré par Raymond Michels (GeoRessources) et Laurent Beccaletto (BRGM)

Co-financement BRGM



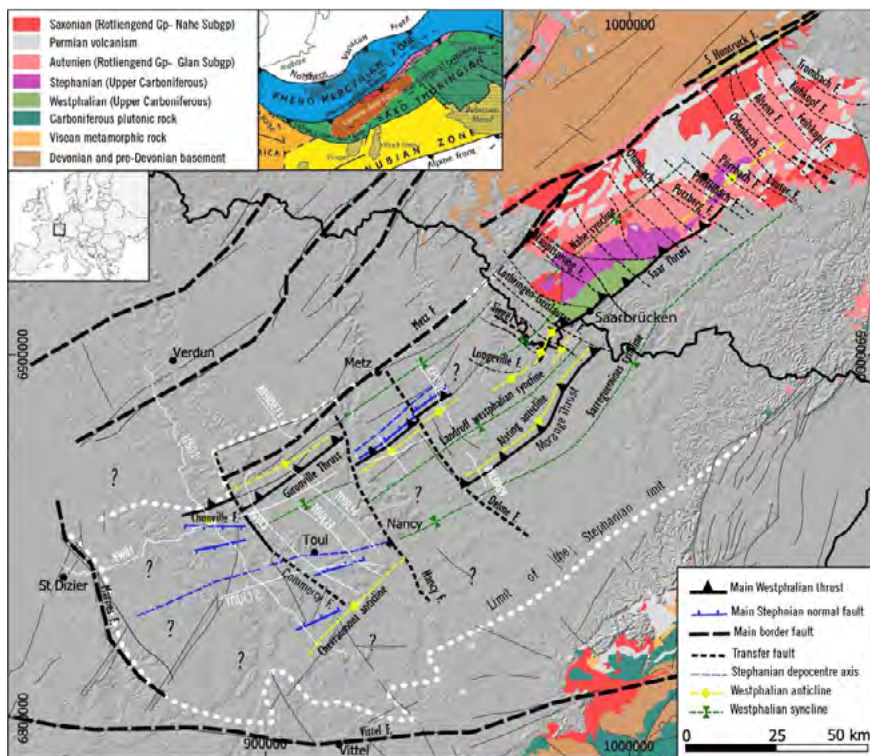
Mes travaux de post-doctorat portent sur l'évolution structurale et sédimentaire du bassin Carbonifère-Permien sarro-lorrain et sa place dans la géodynamique tardi-varisque. Il y a environ 330 millions d'années (Ma), ce bassin intra-montagneux était localisé au cœur d'une chaîne de montagne qui s'étendait dans toute l'Europe centrale. À la fin de la phase de collision et après la fermeture de l'océan Rhénohercynien, les rivières drainant les différents massifs alentours en soulèvement contrôlent la sédimentation importante dans ce bassin. En France, ce bassin est localisé sous les formations mésozoïques de l'est du bassin de Paris et il comprend jusqu'à 6 km de

sédiments alluviaux déposés pendant environ 30 Ma (fin Carbonifère-Permien moyen). Malgré ses dimensions conséquentes (250 km de long, 100 km de large), son contexte tectono-sédimentaire reste incompris à l'échelle régionale. En effet, la stratigraphie établie depuis plus d'un siècle pour l'exploration du charbon ne convient pas à l'étude de l'évolution géodynamique du bassin. De plus, il n'y a pas de modèle structural cohérent liant les deux parties de ce bassin transferralier entre la France et l'Allemagne.

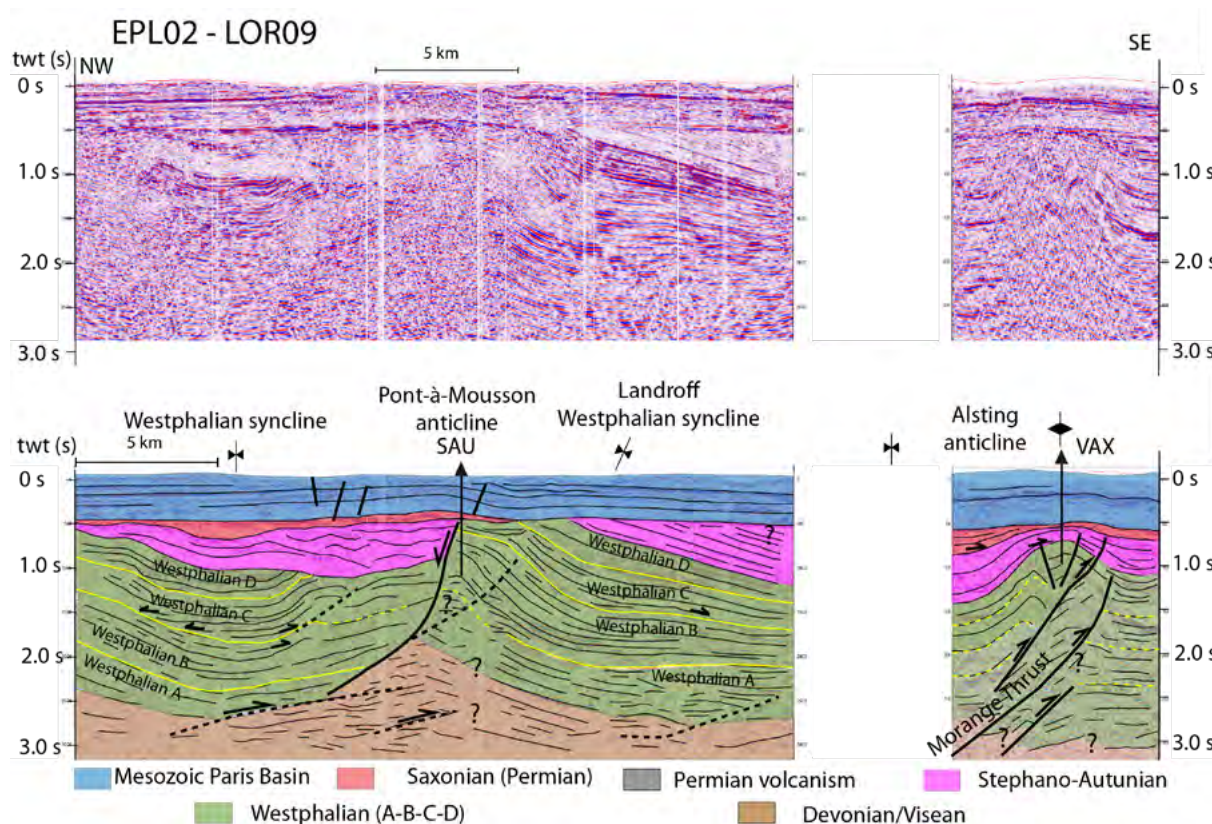
Les objectifs du post-doctorat en cours sont donc les suivants :

- Décipher la dynamique tardi-varisque, à l'aplomb de la suture rhénohercynienne (entre les domaines Saxothuringien et Rhénohercynien);
- Proposer un modèle du remplissage sédimentaire et des architectures alluviales en relation avec les différentes structures ;
- Apporter une cohérence 3D des principales structures et des unités sédimentaires (sous GOCAD et GeoModeller) pour l'exploration des ressources (gaz de charbon, géothermie, disponibilité des réservoirs pour les géostocks).

Les principales questions scientifiques qui sont abordées sont les suivantes : Comment évoluent les bassins intramontagneux pendant la phase tardi-orogénique ? Et, plus spécifiquement dans le bassin sarro-lorrain, quels sont les changements structuraux et paléoenvironnementaux au cours de la transition syn- à post-orogénique ?



Nouveau schéma structural du bassin Carbonifère-Permien sarro-lorrain établi dans le cadre du projet DEEPSURF. La localisation du bassin au sein de la structuration de la chaîne varisque est illustrée (Résultats non publiés)



Profils sismiques EPL02-LOR09 non interprété et interprété (données BRGM retraitées). Notre interprétation documente la structuration du bassin Carbonifère-Permien sous le bassin de Paris (Mésozoïque). Voir explications dans le texte.

Pour le moment, le projet bénéficie des profils sismiques retraités par le BRGM. Les interprétations sismiques permettent de démontrer une inversion tectonique négative entre une phase de compression (Westphalien) et une phase en extension (Stéphano-Autunien). Cette inversion est marquée par la réactivation des chevauchements, la présence de demi-grabens superposés aux anticlinaux westphaliens, ainsi que par la présence d'une discordance majeure à la base du Stéphanien. Le nouveau schéma structural (figure ci-après) montre notamment l'importance des failles de transfert décrochantes et des relais compressifs dans la subdivision en différents sous-bassins, ainsi que la localisation des bassins extensifs post-orogéniques.

En 2021, ce postdoc a bénéficié de financement du projet pour la datation des niveaux de cendres volcaniques (cinérites) intercalées dans les séries sédimentaires de ce même bassin. L'évolution structurale du bassin sarro-lorrain est ici couplée à la datation U-Pb des niveaux de cinérites,

aussi appelées 'tonsteins', pour préciser la chronologie des événements tectoniques entre la Lorraine et la Sarre, et notamment le diachronisme de l'effondrement de la chaîne varisque le long de la suture rhénohercynienne. Ce projet de datation se fait en collaboration avec la plateforme analytique et des chercheurs associés à l'université de Paris-Saclay. Ces travaux en cours montrent que la transition syn- à post-orogénique se produit sur des intervalles de temps de quelques millions d'années et il est important d'obtenir une chronologie absolue précise des événements géologiques pour comprendre les mécanismes d'évolution tardifs des chaînes de montagne. L'évolution spatio-temporelle du processus d'inversion tectonique post-orogénique est hétérogène dans ce bassin intramontagneux où des pulses compressifs sont enregistrés au sein d'un système en subsidence et en extension à l'échelle lithosphérique.

Les interprétations sismiques et la construction du nouveau schéma structural du bassin sarro-lorrain font l'objet d'une publication en cours de préparation.



# Recherche

: Laurie T. Michong





# Axe 4 : incertitudes, évaluation des risques et intégration territoriale

# Manuel Isnardon

## Impact et ancrage du projet de stockage Cigéo dans la région Grand Est

Thèse encadrée par Michel Deshaies (LOTERR) et Marc Bailoni (LOTERR)

Financement ANDRA

### Objectif de la thèse

L'objectif de la thèse est d'apporter une contribution à la connaissance de l'impact des projets industriels sur les régions en déclin démographique et de préciser les conditions qui favorisent l'intégration territoriale de ce type de projet. Le projet Cigéo de stockage des déchets radioactifs de longue durée, qui doit être implanté par l'Andra à la rencontre des départements de la Meuse et de la Haute-Marne, fait partie de ces grands projets industriels susceptibles d'exercer une influence forte sur les dynamiques territoriales. Localisé au cœur d'un des plus vastes ensembles de campagnes dépeuplées de l'est de la France, ce projet, s'il est autorisé, devrait être en phase de construction à partir de 2022, pour accueillir les premiers déchets radioactifs en 2030.

### Méthodologie

Afin de faire une synthèse des dynamiques présentées ci-dessus notre analyse porte sur deux aires distinctes autour du projet Cigéo.

La première couvre les communes situées à 20 kilomètres autour du projet Cigéo. Cette zone d'études compte 75 communes pour 22 477 habitants en 2017. Elle subit une perte démographique importante depuis 1999 avec près de 15 % d'habitants en moins. Elle a pour pôles principaux les communes de Ligny-en-Barrois, Joinville et Gondrecourt-le-Château. Elle est également composée des communes de Montiers-sur-Saulx, Houdelaincourt ou encore Dammarie-sur-Saulx qui font office de pôles relais.

La seconde zone d'analyse est plus vaste, elle représente les communes accessibles en 45 minutes en automobile. Elle englobe les communes de Saint-Dizier, Bar-le-Duc et Toul, comme pôles principaux, Neufchâteau et Commercy comme pôles secondaires ou encore Vaucouleurs comme pôle relais. Cette zone compte 317 communes pour 180 625 habitants en 2017. Elle est également en décroissance démographique avec une perte de 9 % de ses habitants depuis 1999.

Enfin, nos travaux n'oublieront pas d'aborder des sites plus éloignés de Cigéo comme l'aire d'attraction de Nancy, qui peut attirer les célibataires géographiques ainsi que les employés les plus qualifiés, mais aussi la gare Meuse TGV reliant Paris à Strasbourg.

### Travaux réalisés en 2021

L'année 2021 a vu l'avancée de deux volets de la thèse.

#### 1. Entretien avec les élus locaux

Après avoir entendu une vingtaine d'acteurs, aussi bien élus que techniciens, plusieurs pistes de réflexion ont émergées. Bien conscient des difficultés importantes et historiques du territoire en termes économiques, démographiques et sociales, les élus interrogés continuent à voir en l'arrivée potentielle de Cigéo, une véritable opportunité et un levier qui doit enclencher la redynamisation de leur territoire. Cependant, la déception est importante chez les élus qui constatent que les aides ont été diluées sur un grand territoire et n'ont pas permis à celui-ci d'inverser sa dynamique négative. Pour autant, il semble essentiel, pour réussir l'ancrage territorial du projet Cigéo, d'arriver à une vision partagée du futur, qui répond aux enjeux et aux vocations de l'économie locale et de coopération entre public et privé.

À l'inverse, les acteurs privés se sont organisés, à l'instar de l'association ENERGIC 52 55, regroupant plus d'une centaine d'entreprises locales adhérentes en 2020. Cette structuration en réseau leur permet de coordonner leurs efforts et de gagner en efficacité en réponse aux appels d'offres et consultations lancés par l'ANDRA. Les Chambres de Commerces et d'Industrie de la Meuse et de la Haute-Marne ont fusionné en 2018 avec pour objectif de se structurer pour préparer et réussir l'accueil du projet Cigéo autour des entreprises locales, mais aussi en attirant de nouvelles entreprises. Monsieur Jean-Paul Hasseler, Président de la CCI, soulignait lors de notre rencontre le 24 septembre 2019, les avantages à travailler ensemble, en ayant fait disparaître les barrières départementales et appelait de ses vœux les élus départementaux à en faire de même.

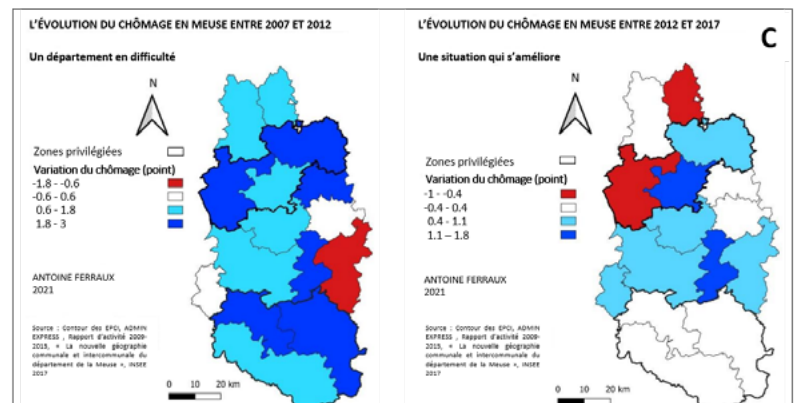
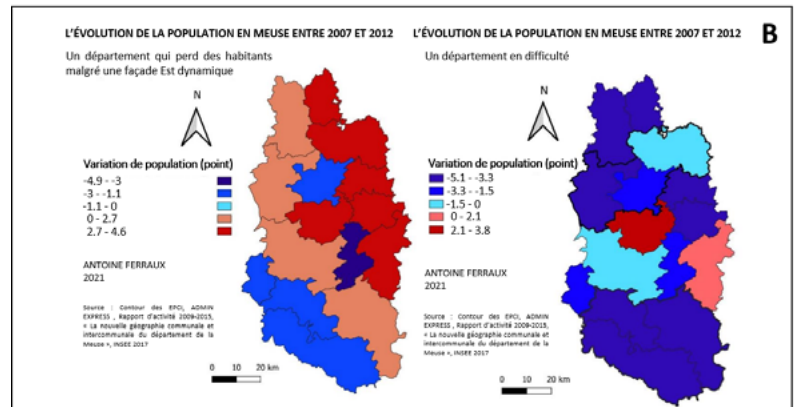
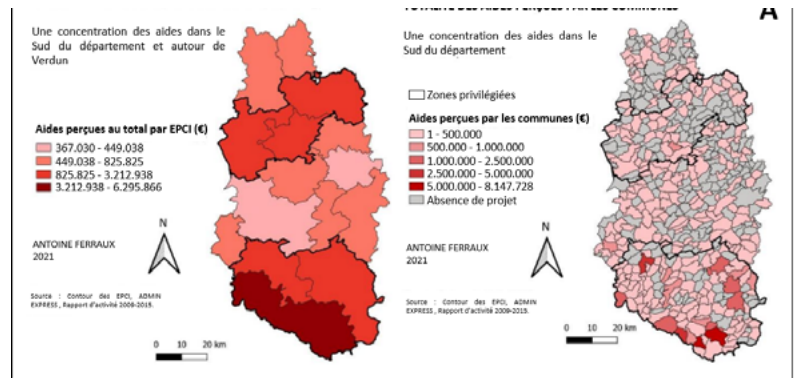
## 2. Étude détaillée du Groupement d'Intérêt Public - Objectif Meuse

Ces travaux ont vocation à paraître en tant qu'article scientifique qui détaillera les résultats des subventions et des dotations versées par le GIP55 entre 2009 et 2015.

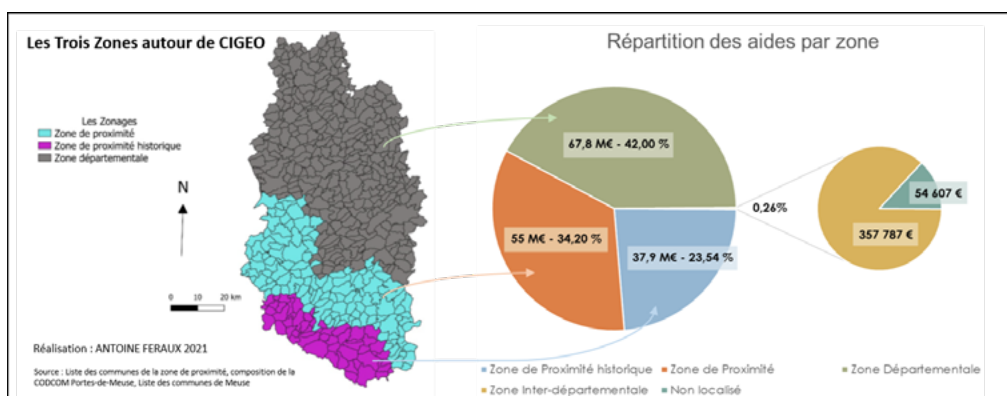
Durant cette période, le cumul des aides versées a atteint un peu plus de 161,2 M€ soit un peu plus de 23 M€ par an en moyenne.

La répartition des aides selon les grands axes des Programmes d'Activité Annuel (PAA) est parlante sur la stratégie adoptée : 79 % de l'ensemble des aides est venu en premier lieu consolider l'économie de la zone puis fixer et endiguer la « fuite » de la population et en attirer de nouvelles par l'amélioration du cadre de vie. Cette stratégie se retrouve dans la répartition des aides par acteurs où les communes, les Établissement public de coopération intercommunale (EPCI) et les entreprises ont perçu respectivement 28 %, 22 % et 21 % des aides.

La répartition des aides par EPCI/communes montre de grandes disparités et des situations très hétérogènes dans le département. Les communes et EPCI situées du sud du département, à proximité de la zone d'intérêt, ayant bénéficié globalement de plus d'aides. Malgré des subventions conséquentes pour lesquelles nous nous serions attendus à un début de redynamisation, du moins dans les zones de proximités, notre étude semble montrer que la distribution des aides publiques par « saupoudrage » dans l'ensemble du département n'a pas réellement permis de briser une dynamique historique et conjoncturelle négative.



Spatialisation A. des aides perçues par EPCI et par communes, B. de l'évolution démographique entre 2007 et 2012 par EPCI et C. de l'évolution du chômage entre les périodes 2007-2012 et 2012-2017 par EPCI.



Répartition des aides dans les zones autour du projet Cigéo

# Céline Kutlu

Les ressources en eaux souterraines franco-allemandes d'un point de vue juridique

Thèse encadrée par Jochen Sohnle (IRENEE)



## Démarche de recherche

La méthode centrale de travail porte sur le droit comparé des normes applicables aux eaux souterraines en France comme en Allemagne. Cependant, mon sujet de recherche porte sur une ressource dont les impacts quantitatifs et qualitatifs ne s'arrêtent pas aux frontières administratives. Il paraît alors indispensable d'étudier le droit de la coopération transfrontalière. Cette thèse doit permettre de promouvoir une ouverture à la transdisciplinarité, essentielle pour répondre aux défis du changement climatique.

## Enjeux

- Parvenir à un bon état qualitatif et quantitatif durable sur les eaux souterraines, adapté aux changements climatiques.
- Orienter les normes de façon à ce qu'elles soient en mesure de concilier des préoccupations socio-environnementales et économiques face aux usages concurrents sur une même ressource.

## Objectifs principaux

- Venir apporter des connaissances sur les régimes juridiques français, allemands et européens, applicables à la gestion, la protection et la restauration des eaux souterraines.
- Étudier la coopération entre des acteurs de l'eau en France et en Allemagne, face à des enjeux communs sur les eaux partagées au sein du district hydrographique international du Rhin (DHI Rhin). Il s'agit par exemple de renforcer les connaissances sur la ressource : inventaires transfrontaliers de l'état des lieux qualitatifs de la ressource (Fig. 1), échanges de données...
- Examiner les lacunes dans la coopération franco-allemande sur la ressource en eau souterraine.

## La rencontre d'acteurs du territoire

Afin d'enrichir mes connaissances sur la gestion et la protection des eaux souterraines, ce travail nécessite d'aller à la rencontre de multiples professionnels français et allemands, compétents dans le domaine de l'eau.

---

## *Un sujet concentré sur une ressource invisible et sans frontière : l'eau souterraine*

---

## Une thèse en cotutelle

Ma thématique de recherche porte sur du droit comparé franco-allemand. J'ai alors souhaité effectuer ma thèse en cotutelle avec l'université de Sarrebruck, en Allemagne. Pour l'année universitaire 2021/2022, je réside et j'effectue mes recherches à Sarrebruck.

## Communications de l'année

L'année 2021 a été marquée par deux interventions en conférence.

- En juillet, je suis intervenue à la journée d'étude organisée par des doctorants de mon laboratoire de droit public, l'IRENEE, à Nancy. Cette manifestation,

intitulée « L'eau douce en droit public : état des lieux et perspectives », m'a donné l'opportunité d'intervenir sur une thématique de mon domaine de recherche. J'ai choisi de présenter le sujet suivant : « L'adaptation de l'agriculture irriguée aux épisodes de sécheresse en France : vers une meilleure gestion quantitative de l'eau ».

- En novembre, j'ai été sollicitée pour participer au colloque international « Science & You » de culture scientifique et technique organisé par l'Université de Lorraine. Cette 4<sup>e</sup> édition avait lieu à Metz. Avec d'autres membres de l'Université de Lorraine, (professeurs et doctorants), nous sommes intervenus dans le cadre d'un symposium sur « la transition énergétique en débat ». J'y ai présenté : « La géothermie profonde en Alsace : une acceptabilité sociale contrastée, obstacle ou garant d'une véritable transition énergétique ? ».

En octobre, la Conférence DEEPSURF organisée à Nancy a été l'occasion pour l'ensemble des membres du projet de se rencontrer, pour la plupart d'entre nous, pour la première fois. De nombreux sujets ont été abordés et j'ai pu présenter un poster portant sur « La lente et difficile revalorisation des sites et sols pollués : le frein juridique ».

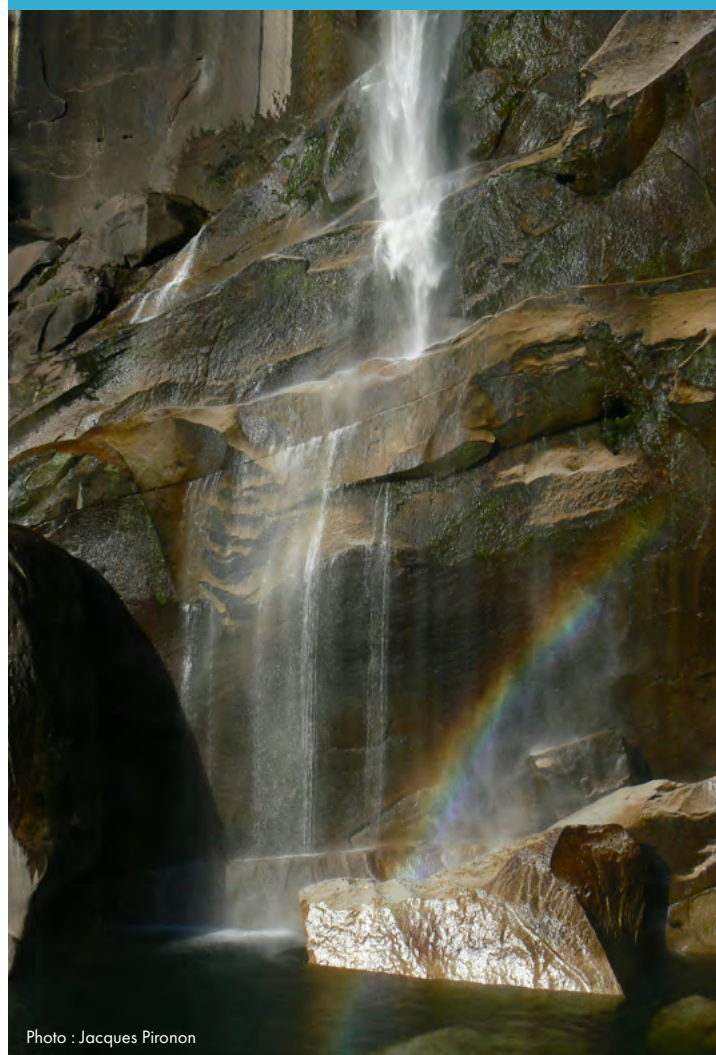


Photo : Jacques Pironon

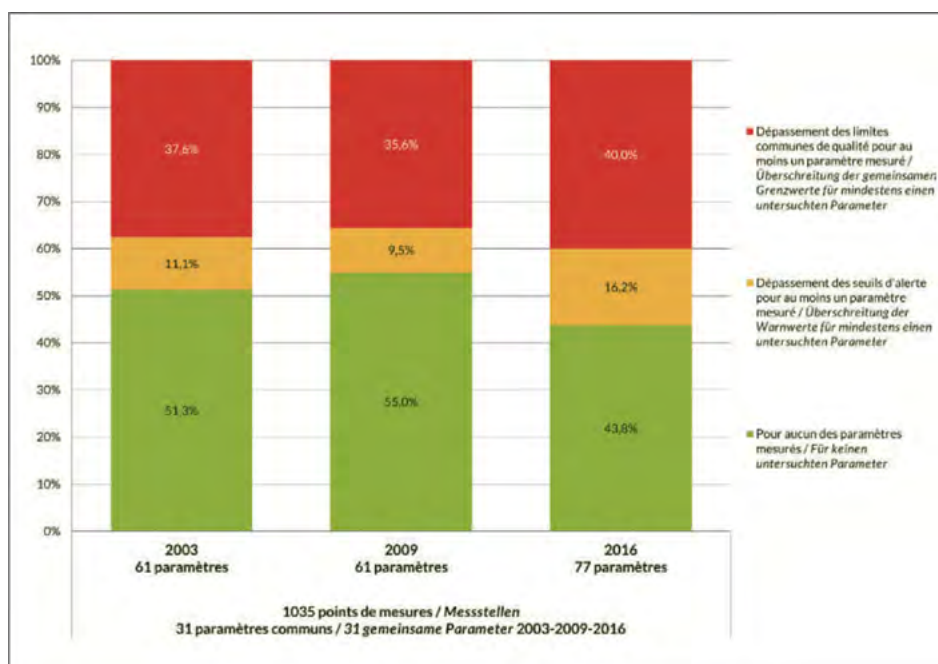


Fig. 1 : La qualité de la ressource au regard des critères communs de potabilité, dans le fossé du Rhin supérieur- Dépassement des seuils d'alerte ou des limites de qualité relative à l'usage « eau potable » - (Projet Ermes-Rhin 2016).

### Une prolongation de la thèse dans le cadre de la crise sanitaire

Dans le cadre des difficultés engendrées par la crise sanitaire, mon contrat de travail a été prorogé de trois mois (du 01/11/2022 au 31/01/2023).

# Catherine Früchart

## Woodstock : Reconstruction historique des stocks et flux de bois

Post-doctorat encadré par Jean-Luc Dupouey (Silva) et Xavier Rochel (LOTERR)

Co-financement Région Grand Est

### Objectifs et méthodes

Le projet Woodstock vise à quantifier des prélèvements et des volumes de bois sur pied dans les forêts de la région Grand Est au cours des siècles passés. L'objectif est de pouvoir comparer des stocks et flux ligneux anciens avec des contextes actuels, et de fournir des informations utiles pour une meilleure connaissance des effets à long terme de prélèvements de bois sur les écosystèmes forestiers. L'approche associe sciences géographiques, historiques et biologiques. L'entrée historique est le fil conducteur de ce post-doctorat.

Après un état des lieux documentaire et une sélection de sources historiques exploitables pour ce projet, des données principalement quantitatives, portant sur des flux et stocks de bois, ont été collectées et compilées en bases interrogeables. Elles sont analysées et leur fiabilité est évaluée : traçabilité de la source, qualité de l'information fournie. Les valeurs extraites sont caractérisées en termes de contenu mesuré, d'unités utilisées, de localisations, surfaces et dates renseignées. Les méthodes de mesurage anciennes sont confrontées aux usages dendrométriques actuels, pour harmoniser les données historiques avec des références actuelles.

### Travaux effectués et premiers résultats

Notre enquête porte sur un corpus constitué parmi un choix de sources pléthoriques. Elle s'intéresse aux consommations de bois dans les duchés de Lorraine et de Bar dans la seconde moitié du 18<sup>ème</sup> siècle, et, pour plus de détails, aux forêts du Comté de Bitche (figure 1). Nous exploitons des registres de procès-verbaux tenus par les officiers des Eaux et Forêts, des enquêtes de terrain à différentes échelles de territoire, et, pour le cadre général, des ouvrages de référence publiés du 18<sup>ème</sup> au 20<sup>ème</sup> siècle. Mélangeant descriptions et quantités, ces sources informent sur des surfaces forestières exploitées et des volumes ligneux extraits. Elles donnent des estimations de stocks et



de productions, chiffrant des consommations : bois-énergie pour l'industrie et le chauffage, besoins en bois d'œuvre.

Les pratiques dendrométriques sont mal décrites avant le 19<sup>ème</sup> siècle ; c'est un point de difficulté pour cette étude, surtout pour quantifier des stocks sur pied. La multiplication des règlements et usages sous l'Ancien Régime, en particulier pour les unités de mesure est aussi un obstacle, toutefois surmontable, même s'il complique la quantification des flux.

Une enquête réalisée à la veille de la Révolution française (De Dietrich 1789, 1800) a été retenue pour esquisser une perspective régionale. Elle documente assez précisément les consommations de bois des « bouches à feu » (métallurgie, salines, verreries, productions céramiques) alors en activité en Lorraine et en Alsace. De premiers résultats permettent d'évaluer la consommation en bois-énergie pour la métallurgie à environ 0,72 million de

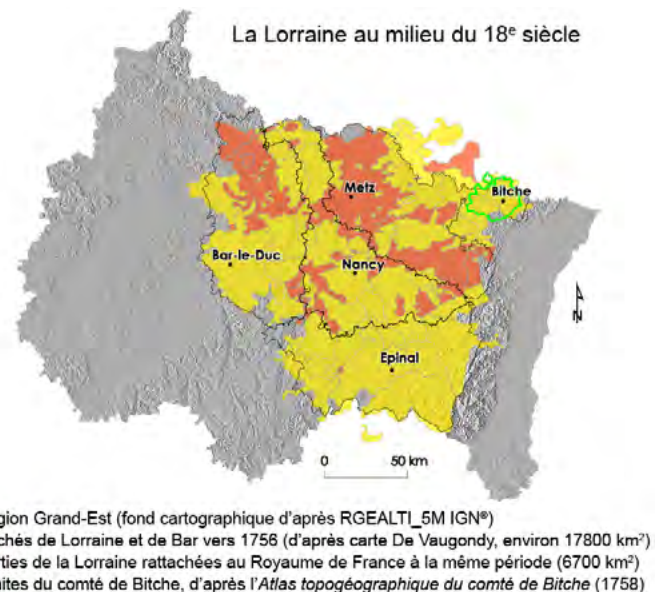
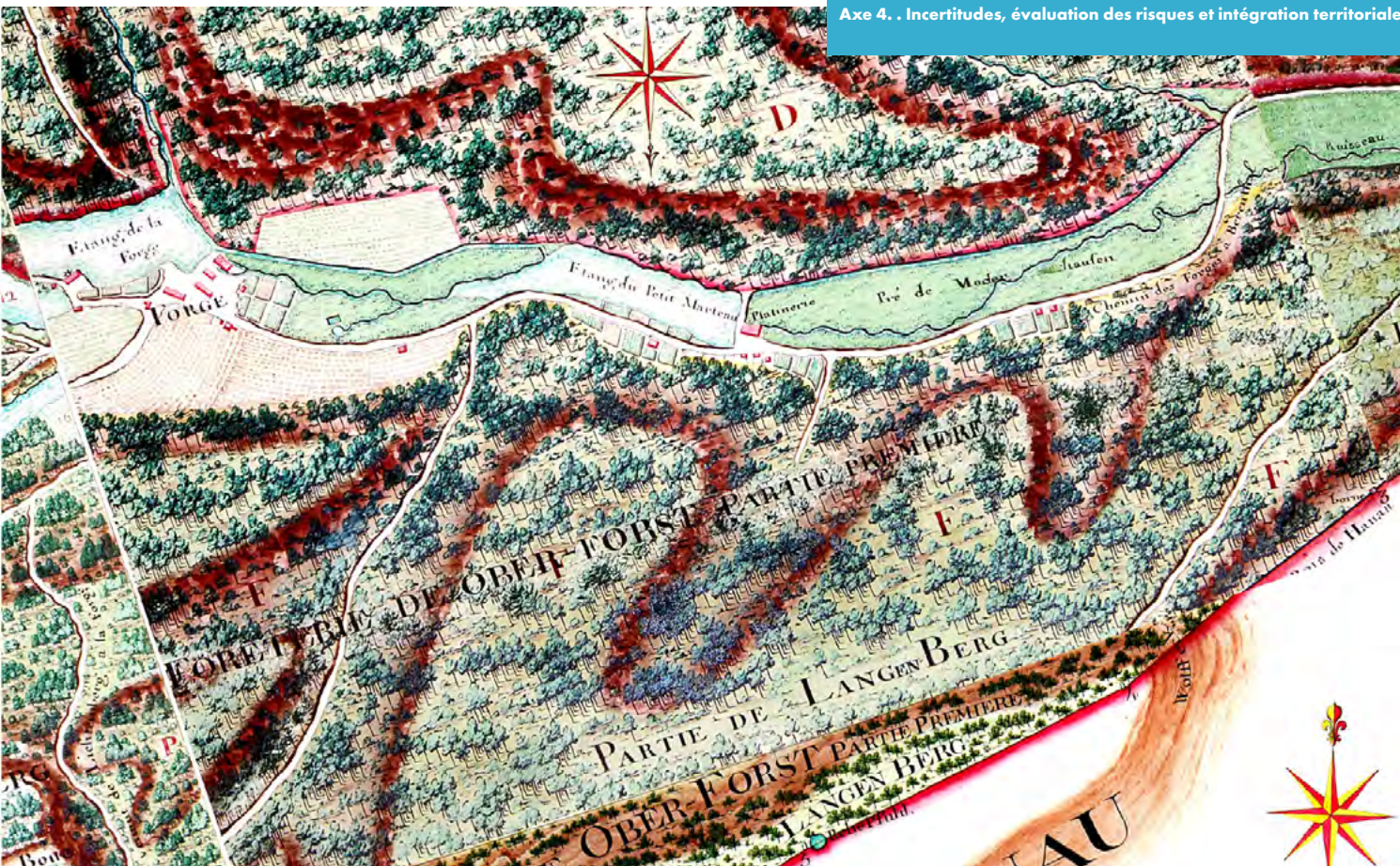


Figure 1 : Emprise des duchés de Lorraine et de Bar au milieu du 18<sup>ème</sup> siècle et localisation du comté de Bitche à la même période. Illustration C. Fruchart 2022



stères de bois par an. Cette consommation alimente une soixantaine d'établissements en activité en 1785 (47 en Lorraine, 13 en Alsace).

Plus localement, le comté de Bitche a bénéficié vers 1755 d'un levé topographique quantitatif et descriptif (Chappe d'Auteroche 1758). Il informe sur 209 km<sup>2</sup> de forêts où dominaient le chêne et le hêtre. Il évalue, exprimés en cordes de bois façonné dans le système de mesure français en vigueur, les volumes de hêtre et chêne sur pied dans les forêts visitées : 1 161 342 cordes de bois (environ 4,5 millions de stères) avaient été comptabilisées sur une surface de 17 367 hectares. S'ajoutent à ces quantités estimées, 97 937 chênes « bons pour le marché de la Hollande », une catégorie de bois d'œuvre de qualité supérieure nécessitant un diamètre minimal du fût d'environ 70 cm.

Par ailleurs, des registres de procès-verbaux de la Maîtrise des Eaux et Forêts (figure 2) témoignent des exploitations réelles des forêts de Bitche entre 1763 à 1783 et quantifient les prélèvements effectués. Les quantités de bois de feu utilisées entre 1763 et 1783 par les 5 établissements industriels implantés sur ce territoire de 550 km<sup>2</sup> (3 verreries et 2 forges) s'élèvent à 968 000 stères de bois (576 800 stères pour les forges, 391 200 pour les verreries), récoltés sur 6 400 hectares de forêts appartenant toutes au domaine royal. Ceci porte la consommation moyenne annuelle de bois de ces industries à 28 900 m<sup>3</sup>, qui, rapportés en volume par hectare et par an, s'élèvent à 94,8 m<sup>3</sup>/ha.

Extrait de l'Atlas topogéographique du comté de Bitche (1758), conservé aux archives départementales de Moselle, CP 986-988

Le travail de compilation de données et d'analyse est encore en cours et les résultats finaux sont prévus pour l'automne 2022.



Figure 2 : Extrait de registre de procès-verbaux de la Maîtrise des Eaux et Forêts de Sarreguemines. Source Archives départementales de Meurthe-et-Moselle, B 10686, cliché X. Rochel 2016

# Journée Jeunes Chercheurs

zoom





La Journée Jeunes Chercheurs du projet DEEPSURF a été préparée et organisée par les jeunes chercheurs eux-mêmes.

La session du matin a eu lieu sur Teams. Les présentations étaient à la fois en français et en anglais. Le séminaire était divisé en cinq sessions, dans lesquelles les doctorants et post-doctorants ont pu présenter leurs sujets de recherche. Chaque session était suivie par un temps de question. Au total, plus de 60 personnes ont participé à la session du matin.

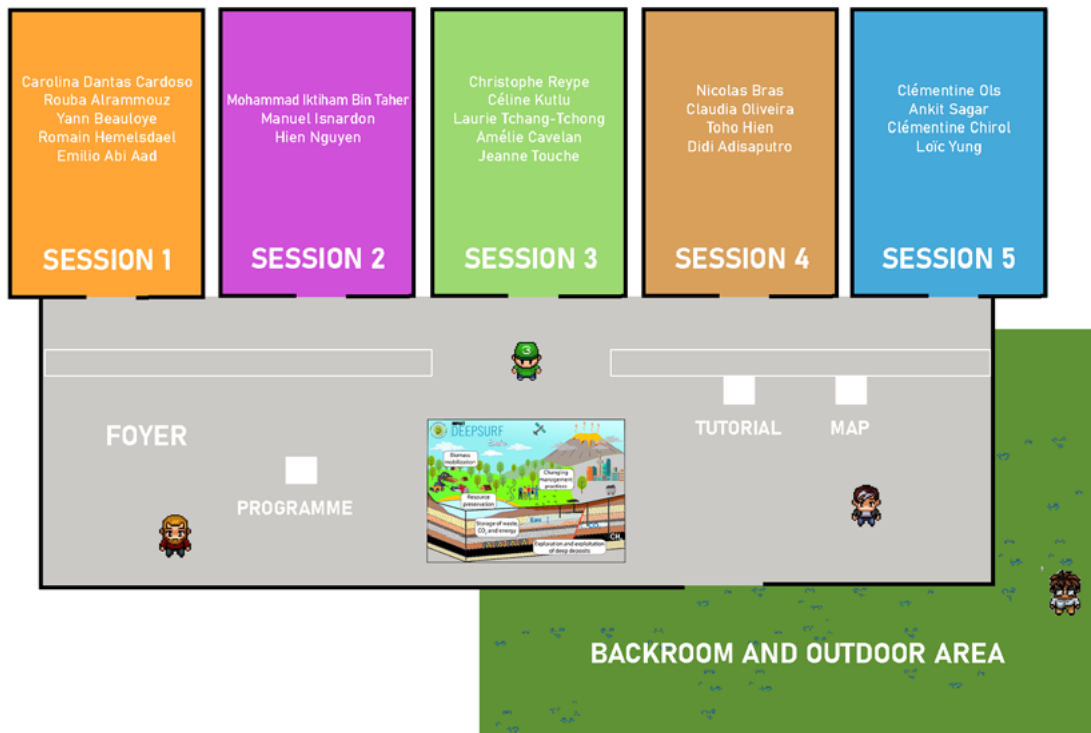
L'après-midi était dédié à une session poster, organisée sur l'application Gather Town, que Clémentine Chirol a spécialement conçu pour cet événement. Cinq pièces ont été construites, correspondant aux cinq sessions de la matinée. Les jeunes chercheurs étaient présents dans leurs salles de poster pour échanges avec les participants.

Les participants sont représentés sur la carte Gather Town par un petit personnage et peuvent se déplacer sur la carte en utilisant les flèches directionnelles du clavier.

Plus de 40 personnes se sont connectées sur Gather Town. D'enrichissantes discussions ont eu lieu, à la manière d'une réelle session poster. La session poster s'est terminée aux environs de 17 heures par un discours de clôture de Jacques Pironon. Les discussions informelles se sont poursuivies autour de jeux ou des espaces extérieurs proposés par la plateforme.



## MAP OF THE POSTER SESSION



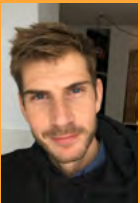
### Section 1: Exploration and exploitation of deep deposits



**Carolina Dantas Cardoso** CRPG  
Continuous isotopic tracing of crustal fluids transfer related to natural (seismic/volcanic) or anthropogenic hazards



**Rouba Alrammouz** GeoRessources / Institut Lafayette  
New microelectronic sensor technology for helium detection



**Romain Hemelsdaël** GeoRessources / BRGM  
Construction of a 3D geological model of the Carboniferous-Permian Lorraine and Sarr-Nahe basins (France, Germany)



**Emilio Abi Aad** GeoRessources  
Modélisation physique et numérique de la stabilité d'un ouvrage souterrain dans un milieu rocheux

### Section 2: Storage of waste, CO<sub>2</sub> and energy



**Mohammad Iktiham Bin TAHER**  
GeoRessources / Institut Lafayette  
Nouveau type de capteurs de gaz à base de transistors HEMT pour l'analyse bio-géochimique in situ

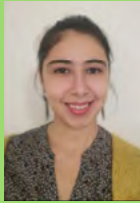


**Manuel Isnardon** LOTERR / ANDRA  
Impact et intégration du projet Cigéo



**Nho Gia Hien NGUYEN** GeoRessources  
Hydro-Mechanical behavior of faults in the context of CO<sub>2</sub> geological storage

## Section 3: Resource preservation



**Céline Kutlu** IRENEE

La gestion des ressources en eaux souterraines : vers un renforcement progressif de la coopération franco-allemande, face à des enjeux communs



**Christophe Reype** IECL

Analyse statistique bayésienne de données hydrogéochimiques via les processus ponctuels : un outil de détection de sources dans un mélange de fluides à plusieurs composantes



**Laurie Tchang-Tchong** GeoRessources

Hydrocarbons as markers of transfer between deep reservoirs and the critical zone. Case study of the Pechelbronn Basin



**Amélie Cavelan** LIEC / GeoRessources

Impact des fluctuations du niveau des nappes phréatiques induites par le changement climatique sur la mobilisation des contaminants pétroliers (LNAPLs)



**Jeanne Touche** BEF / GeoRessources

Effet de la sécheresse sur le fonctionnement biogéochimique d'un écosystème forestier

## Section 4: Increased biomass mobilisation



**Nicolas Bras** Silva

Consommation de méthane par les sols forestiers : variabilité spatiale des processus physiques et biotiques impliqués en vue d'estimer le puits des forêts lorraines



**Claudia Oliveira** LIEC

Charcoal and coal: energy resources with a strong impact on the past environment and ongoing stakes for energy transition



**Toho Hien** BETA / LSE

Production de biomasse énergétique suivant un gradient d'anthropisation des sols. Analyse croisée du capital naturel et de la valeur économique des services écosystémiques rendus

## Section 5: Changing management practices



**Clémentine Ols** LIF

Monitoring climate change effects on forest productivity



**Ankit Sagar** LIF

Multisource Forest Inventory: a generic and flexible tool for forest resource estimation and mapping at a fine scale



**Clémentine Chiroi** LSE / BEF

COSMOS - Compromises and optimisation of ecosystem services provided by soils



**Loïc Yung** LIEC / LSE

Understanding and optimization of plant - plant - fungi interactions to improve the phytomanagement of marginal lands

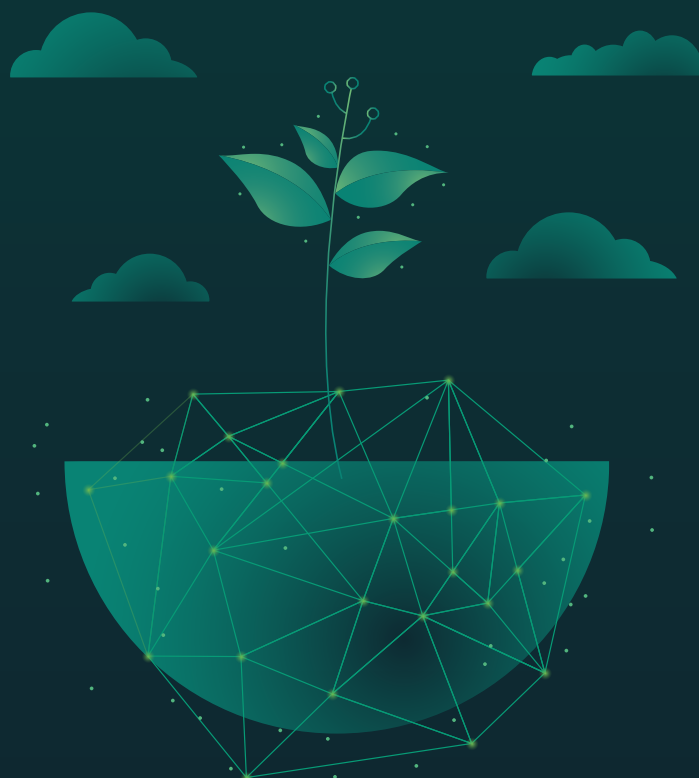
**DEEPSURF**  
**Conference 2021**

**zoom**



# DEEPSURF CONFERENCE

TOWARD SOLUTIONS FOR ENERGY AND ECOLOGICAL TRANSITION



12<sup>th</sup> October, 2021 - 14<sup>th</sup> October, 2021

[www.deepsurf-ic.univ-lorraine.fr](http://www.deepsurf-ic.univ-lorraine.fr)



Deux journées de conférences au Campus Artem, Nancy

### La conférence

La DEEPSURF Conference est un congrès scientifique international qui invite des chercheurs, industriels et décideurs à contribuer au débat sociétal sur les questions des transitions écologiques et énergétiques.

Le congrès est organisé dans le cadre du projet de recherche DEEPSURF, financé par l'initiative Lorraine Université d'Excellence. Dans le cadre de ce projet, environ 100 scientifiques mettent leurs recherches en commun pour apporter des réponses sur ces thématiques fondamentales pour la société. Le projet se distingue par l'interdisciplinarité de ses acteurs et partenaires : géosciences, environnement, pédologie, sciences forestières, mathématiques appliquées, géographie, psychologie, économie, histoire, sociologie, sciences politiques, droit.

La première édition de la DEEPSURF Conference a eu lieu en octobre 2021 sur le campus Artem à Nancy. Suite au succès de cette première édition, et ce, malgré un contexte sanitaire complexe, une édition 2022 est en préparation.

Elle a réuni une centaine de chercheurs, ingénieurs ou industriels internationaux qui ont fait état de leurs recherches et études sur les thématiques suivantes :

- Utilisation des sols, des forêts et du sous-sol dans le cadre de la transition énergétique (stockages géologiques, production de biomasse énergétique, valorisation de friches industrielles, etc.) ;
- Transferts de matière et de chaleur entre les compartiments géologiques profonds et la surface lors de leur utilisation dans le cadre de la transition énergétique ;
- Perceptions sociétales et impacts territoriaux liés à l'utilisation du sol et du sous-sol pour la transition

énergétique.

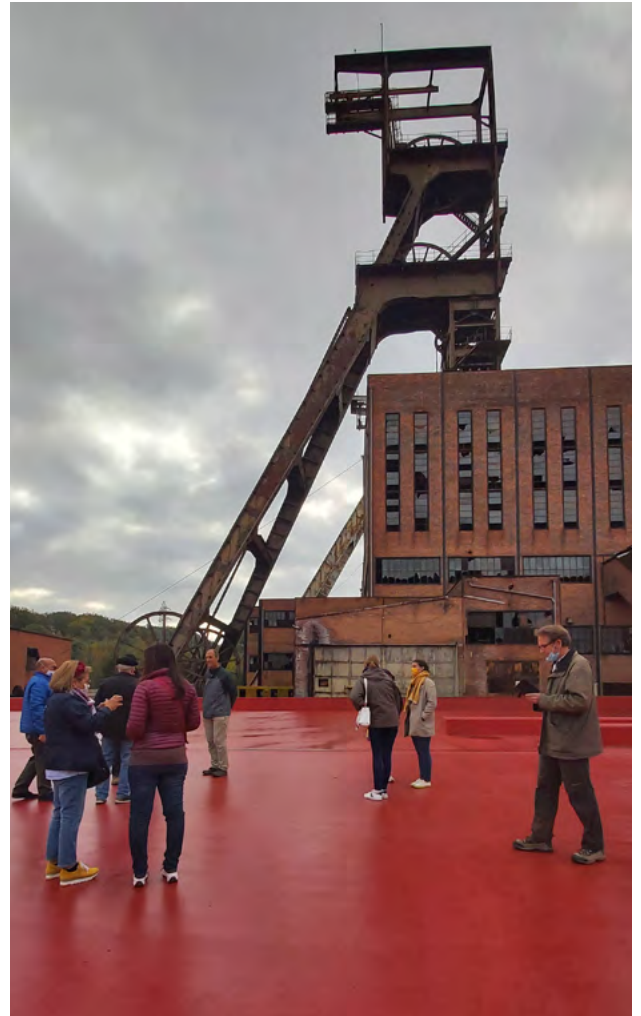
- La neutralité carbone, quels sont les risques et les opportunités ? (réduction des émissions de gaz à effet de serre, amélioration de la séquestration du carbone)

Deux jours de la conférence étaient dédiés aux colloques scientifiques. Les présentations étaient organisées en sessions plénières, proposant des perspectives globales sur la transition énergétique et écologique. Ces présentations ont été ponctuées de sessions spécifiques sur le sous-sol, les sols, la forêt, et les sites pilotes et démonstrateurs, qui ont eu lieu en parallèle.

## Les excursions

À l'instar du projet DEEPSURF, cette conférence vise un fort ancrage territorial. En effet, nos collègues internationaux ont eu la chance de participer à une journée d'excursions dans le Grand Est, incluse dans le pack d'inscription, au choix parmi plusieurs parcours. L'objectif est de montrer le lien entre milieu profond et écosystèmes au travers de l'histoire de l'exploitation du sous-sol en région Grand Est qu'elle soit passée ou à venir. On s'attache à décrire les phénomènes en surface, en profondeur, et à contextualiser ses visites dans des cadres géographiques, historiques et sociaux.

- Une visite, dans la Meuse, du laboratoire souterrain pour les expérimentations sur le stockage géologique de déchets nucléaires de l'ANDRA, couplée avec une visite de dispositifs expérimentaux de simulation d'une sécheresse et de surveillance de l'environnement en forêt de l'INRAE, dans la forêt de Montiers-sur-Saulx.
- Une visite, en Moselle, du Musée des Mineurs Wendel où les congressistes ont pu faire un bon dans le temps et revivre l'âge d'or des mines de charbon. De retour à la surface, les visiteurs ont découvert le site pilote européen pour les usages du sol et du sous-sol pour la transition énergétique, situé à Folschviller.
- Une visite d'une des dernières mine en activité en France, la mine de sel de Varangéville. L'après-midi était dédiée à une balade historique à Marsal pour partir à la découverte des mares salées de la Seille, ses conséquences sur la biodiversité et l'usage de ce sel dans l'antiquité.



Visite du Musée Les Mineurs Wendel



Découverte de la dernière mine de sel encore en activité en France







# ANNEXES

## Partenaires du projet

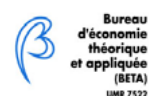
### 9 ÉTABLISSEMENTS PUBLICS



### 6 ENTREPRISES



### 12 LABORATOIRES DE RECHERCHE





Projet IMPACT DEEPSURF

Laboratoire GeoRessources  
Faculté des Sciences et Technologies  
Campus des Aiguillettes  
BP 70237  
54506 Vandœuvre-Lès-Nancy

Email : [deepsurf-contact@univ-lorraine.fr](mailto:deepsurf-contact@univ-lorraine.fr)

Site web : [ue.univ-lorraine.fr/impact-deepsurf](http://ue.univ-lorraine.fr/impact-deepsurf)

Twitter : @IMPACT\_DEEPSURF

---

Publication : mars 2022  
Conception - Réalisation : GeoRessources  
Crédits photos : DEEPSURF, membres et  
partenaires du projet DEEPSURF