



DEEPSURF

RAPPORT

D'ACTIVITÉ

ANNÉE 2020

deepsurf-contact@univ-lorraine.fr

lue.univ-lorraine.fr/impact-deepsurf

twitter.com/IMPACT_Deepsurf



IMPACT

DEEPSURF



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



Les chiffres clés de 2020

15 partenaires

12 laboratoires

2 sites pilotes

14 thèses en cours

7 post-doc recrutés
et **1** en cours de
recrutement

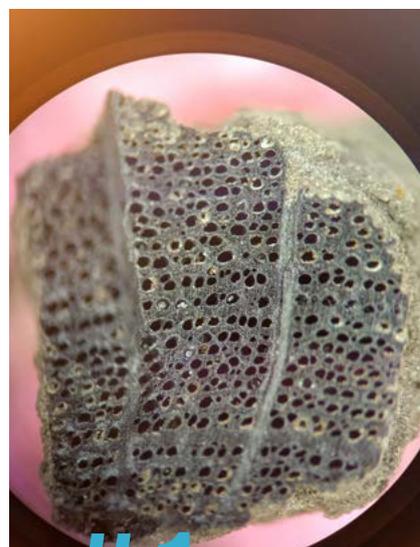
1 séminaire
scientifique

1 brunch

1 inauguration

3 127 047 € de
budget total

dont **478 250 €**
d'apports extérieurs



#1

LE PROJET

Présentation du projet

Page 2

Présidence du Comité Scientifique

Page 3

Budget

Page 4

Publications et communications

Pages 5 - 9

Effet levier

Pages 10 - 13

CSTI

Pages - 14



#2

LA RECHERCHE

Axe 2 : Nouvelles approches pour la transition énergétique

Pages 15 - 30

Axe 3 : Interactions profond - surface

Pages 31 - 57

Axe 4 : Incertitudes, évaluation des risques et intégration territoriale

Pages 58 - 66

Bilan des actions de recherche

Page 67



#3

FAITS MARQUANTS

Calendrier

Pages 69 - 70

Brunch

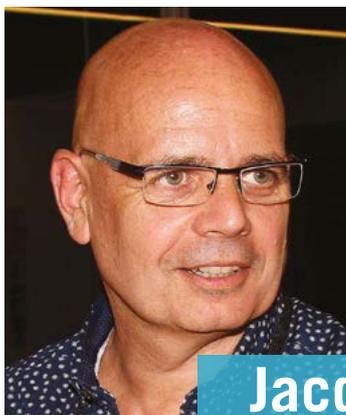
Pages 71 - 73

Séminaire DEEPSURF #3

Pages 74 - 87

Les actions à venir

Page 88



Jacques Pironon
Porteur du projet DEEPSURF

2020 restera à jamais l'année du coronavirus avec son lot de déprogrammations, de reports, de confinements, de prises de distance avec ses collègues, ses amis, sa famille. Malgré cela, les jeunes chercheurs de DEEPSURF ont montré un dynamisme exceptionnel, marqué par des avancées majeures et l'émergence de nouveaux concepts. On pourra citer l'écologie historique qui devient un outil pour notre futur, la notion de capital naturel intégrée à l'analyse économique des services écosystémiques des sols, la cartographie haute résolution des gisements de bois, les nouveaux capteurs HEMT ou les échantillonneurs temporels pour la détection des gaz, ou encore l'analyse et l'interprétation des données acquises par la tour à flux à Montiers, pour prendre de la hauteur. 2020 fut aussi une année de sécheresse intense dont l'impact sur le développement forestier est au cœur des travaux de Clémentine Ols et Jeanne Touche.

L'inauguration en septembre du dispositif sécheresse de l'INRAE en forêt de Montiers, unique en Europe, a permis d'apprécier la créativité des équipes de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens qui œuvrent pour déterminer expérimentalement et *in situ* l'effet de la diminution des précipitations au printemps sur le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème forestier local.

Mais 2020 a été aussi marquée par le sauvetage d'échantillons de trois forages historiques profonds du bassin lorrain par sept étudiants de l'ENSG sous la houlette de leurs enseignants et de la Française de l'Énergie. Ce sont ainsi 2500 mètres de notre passé qui ont été rapatriés en Lorraine. Ils vont aider à améliorer nos modèles 3D du sous-sol et contribueront à mieux comprendre l'histoire des migrations naturelles d'hydrocarbures vers le

milieu superficiel comme Laurie Tchang-Tchong le fait sur le site historique de Pechelbronn en Alsace. DEEPSURF a su être agile et nous avons pu organiser notre troisième séminaire sur le stockage de carbone lors d'une réunion hybride physique - virtuelle, qui a permis à notre marque de fabrique, la pluridisciplinarité, de trouver un espace d'échanges et d'interactions.

La fin d'année fut aussi l'occasion d'une première soutenance de thèse par Yann Beauloye. Beau symbole que de commencer une longue série labellisée « DEEPSURF » par une approche de sciences humaines et sociales sur l'ancrage territorial d'un projet d'exploitation de gaz de charbon au sein d'un espace en mutation : l'ancien bassin houiller lorrain. D'autres suivront sur le territoire sud-meusien ou les environnements frontaliers.

2020 a vu poindre également des travaux qui créent le lien avec les Labex ARBRE et RESSOURCES21 comme la résilience des peuplements de conifères face aux variations climatiques à venir pour le premier ou comme la détection de structures dans des données hydrogéochimiques spatialisées et la traçabilité améliorée par l'élaboration d'une « carte d'identité » des métaux pour le second.

2020 fut aussi une année présidentielle pour DEEPSURF avec la nomination d'une nouvelle Présidente du Comité Scientifique, Florence Delprat-Jannaud, de l'IFPEN, du Club CO2 et de l'ANCRE (Alliance Nationale de Coordination de la Recherche sur l'Énergie) ; sûr que son esprit curieux et sa grande compétence sauront guider nos ambitions vers de nouvelles frontières.

DEEPSURF

Présentation du projet

Le projet IMPACT DEEPSURF est un projet de recherche dans le cadre de l'initiative Lorraine Université d'Excellence (LUE) qui s'intéresse aux échanges de chaleur et de matière entre les compartiments géologiques profonds, la zone critique et la surface, lors de leur utilisation pour la transition énergétique (i.e. stockages géologiques, exploitation de ressources fossiles à faible empreinte carbone, production de biomasse énergétique). DEEPSURF forme une communauté de recherche pluridisciplinaire couvrant les domaines des géosciences, de la biologie, des sciences de l'environnement, du sol, de la forêt, des mathématiques appliquées, de l'économie, de la géographie, de la psychologie et du droit public. Le projet regroupe un consortium de quinze partenaires, dont neuf établissements publics et six sociétés privées. Douze laboratoires de recherche lorrains sont impliqués (cf. annexe).

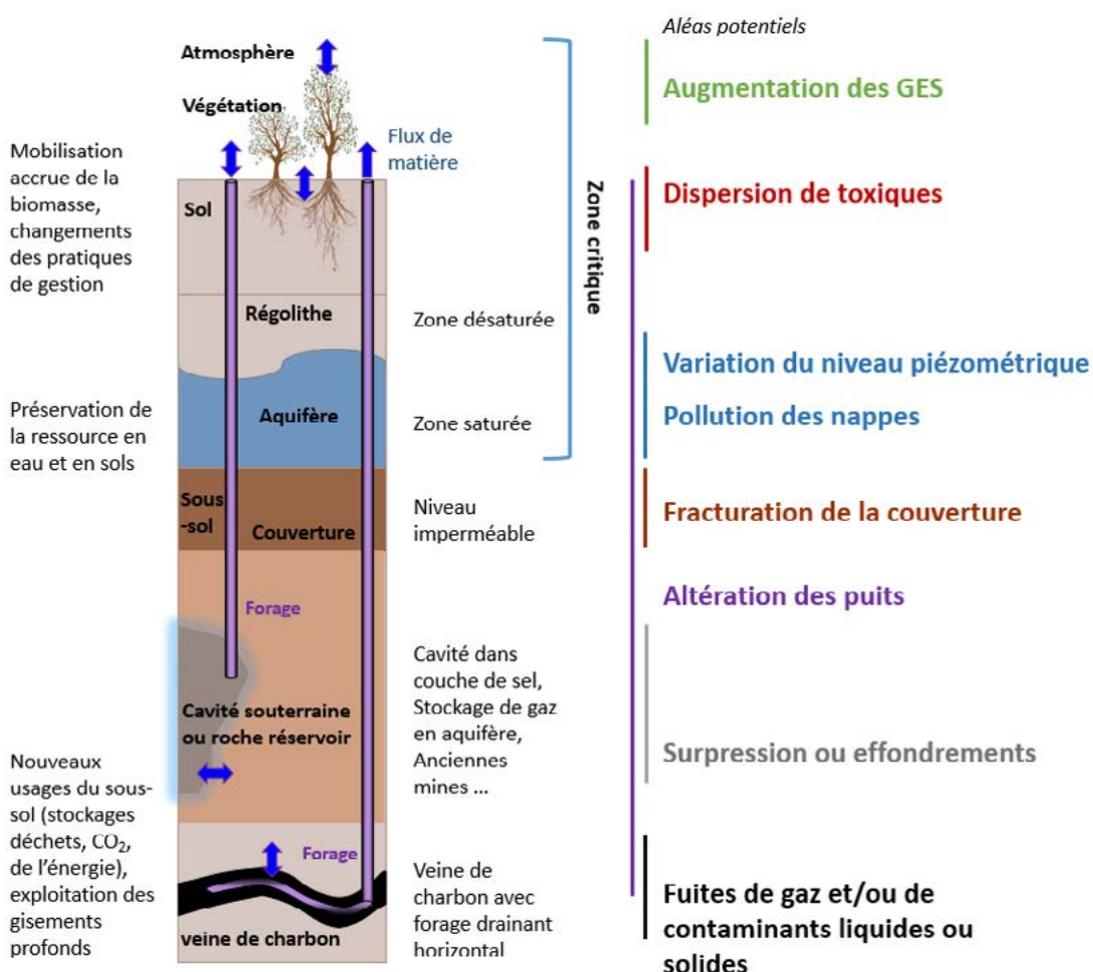
L'originalité du projet réside dans la mise à disposition de deux sites pilotes par les partenaires, l'ANDRA et la Française de l'Énergie (LFDE). Les équipes de recherche de DEEPSURF ont accès aux sites et données du centre Meuse Haute-Marne de l'ANDRA, situé à Bure : Laboratoire Souterrain et Observatoire Pérenne de l'Environnement - OPE ; ainsi qu'à un forage de LFDE de 1 kilomètre de profondeur dans le bassin houiller lorrain sur la commune de Folschviller.

Organisation

Le projet est organisé en cinq Work Packages (WP ou axes thématiques), dont trois axes scientifiques présentés dans la partie II - La Recherche, un axe (WP1) consacré à la gestion du projet et un (WP5) à la communication et aux interactions avec les autres programmes de LUE.

La gouvernance

La gouvernance du projet s'effectue au niveau du comité exécutif et du comité scientifique (respectivement, COMEX et CS). Le COMEX est le lieu de décision des actions du projet (recrutement, thèmes de recherche, budget, etc.). Il est réuni en moyenne tous les deux mois par le chef de projet. Les avancées scientifiques du projet sont examinées par le CS, qui est composé des directeurs des laboratoires impliqués dans DEEPSURF, ainsi que d'un représentant de chacun des partenaires. Le CS est présidé par Dr. Florence Delprat-Jannaud, ingénieure de recherche et responsable de programmes à l'IFP Énergies Nouvelles. Le CS se réunit deux fois par an par convocation de la Présidente .



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.



Florence Delprat-Jannaud

Présidente du Comité Scientifique

« Bonjour Florence, pouvez-vous vous présenter brièvement ainsi que vos activités principales ?

Je suis responsable de programme à IFP Énergies Nouvelles, en charge de deux programmes de recherche et d'innovation: un premier sur le captage et stockage du CO₂ et les solutions à émissions négatives et un second sur les ressources et usages du sous-sol pour la transition énergétique. Je suis aussi présidente du Club CO₂, association qui regroupe 30 acteurs français de l'industrie et de la recherche de la filière Captage Stockage et Valorisation du CO₂. Je co-anime un groupe programmatique de l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE) dédié aux ressources et usages du sous-sol et à ce titre je participe à la coordination d'un projet transverse sur les puits de carbone qui vise à faire un état de l'art des technologies à émissions négatives et une évaluation de leur potentiel pour atteindre la neutralité carbone, en France notamment. Enfin, je suis co-titulaire de la Chaire CarMa, chaire IFP School financée par TOTAL, sur les émissions négatives.

Qu'est-ce qui vous a amené à accepter la responsabilité de présidente du comité scientifique de DEEPSURF ?

Le projet DEEPSURF est un projet qui répond aux enjeux de la transition énergétique qui me sont chers. Il porte une recherche pluridisciplinaire avec des acteurs académiques et industriels

des domaines des géosciences, des sciences du sol, des sciences forestières, de la biologie, des mathématiques, de l'économie, de la géographie, de la psychologie et du droit public. Et c'est à travers ces échanges de savoir interdisciplinaires que l'on pourra relever les défis du monde de demain.

Le projet DEEPSURF est donc un projet ambitieux qui, de plus, s'appuie sur des sites pilotes phare de la Région Grand Est et je suis convaincue qu'il permettra d'apporter des solutions concrètes aux enjeux complexes de la transition énergétique.

Quelle résonance pourrait avoir DEEPSURF à l'échelle nationale, notamment par rapport à l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 ?

Le projet DEEPSURF s'appuie sur un ancrage territorial fort, des compétences régionales fortes et c'est un atout car le développement de solutions pour la transition énergétique nécessite de prendre en compte les spécificités des écosystèmes territoriaux.

Mais bien entendu les enjeux auxquels le projet DEEPSURF répondent sont ceux de la transition énergétique. Le projet DEEPSURF s'inscrit donc dans les ambitions nationales. C'est un projet important dont les travaux pluridisciplinaires devraient faire référence en matière d'études, de solutions pour la neutralité carbone à horizon 2050.



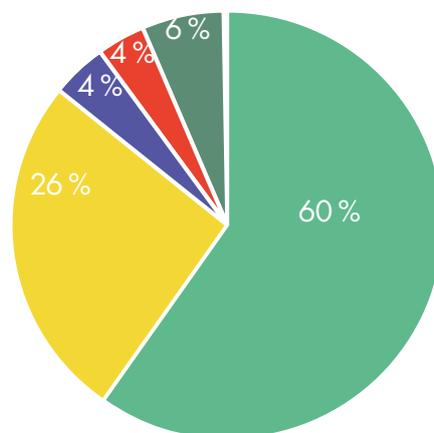
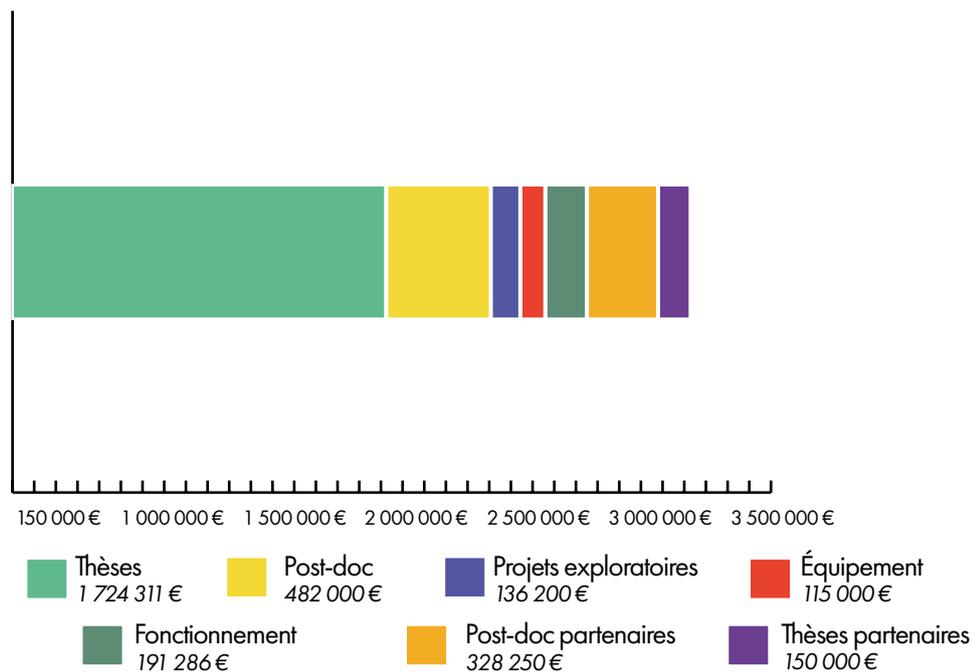
DEEPSURF

Budget

Le projet DEEPSURF dispose de deux sources de financement : LUE (montant total : 2 648 797 €) et la contribution de partenaires ou d'autres types de co-financements, ce que l'on peut regrouper sous l'étiquette « d'effet levier » (montant total : 478 250 €). Le budget total s'élève ainsi à **3 127 047€**.

La répartition des crédits est présentée sur les deux diagrammes en fonction des différents postes de dépenses. Les thèses et les contrats post-doctoraux sont les actions principalement financées par DEEPSURF, chacun de ces postes de dépenses s'élevant respectivement à 1 874 311 €, soit 60 % du budget

total, et 810 250 €, soit 26 % du budget total. A cela s'ajoute trois postes de dépenses presque équivalents en termes de montant : (1) le fonctionnement pour 191 286 €, soit 6 % du budget, (2) les projets exploratoires qui sont d'autres actions de recherche en rupture ou en soutien à d'autres actions déjà financées, pour 136 200 €, soit 4 % du budget total, et (3) les équipements pour 115 000 €, soit 4 % du budget total. Ce type de projet de recherche n'a pas vocation à financer des équipements, mais plutôt de développer de la recherche via le recrutement de jeunes chercheurs, doctorants ou post-doctorants.



Répartition budgétaire en proportion par action

2020 - 27 publications

1. Ahmadikhamsi S., **Golfier F.**, Oltean C., Lefèvre E., Amir Bahrani S. (2020) Impact of surfactant addition on non-Newtonian fluid behavior during viscous fingering in Hele-Shaw cell. *Physics of fluids*, 32, 012103
2. Aminnaji M., **Golfier F.**, Niasar V. J., Babae M. (2020) Interplay of biofilm growth, NAPL biodegradation and micro-scale heterogeneity in natural attenuation of aquifers delineated by pore-network modelling. *Advances in Water Resources*, 145, 103750
3. Arrieta-Escobar, J., **Derrien, D.**, Ouvrard, S., Asadollahi-Yazdi, E., Hassan, A., Boly, V., Tinet, A.-J., Dignac, M.-F. (2020) 3D printing: An emerging opportunity for soil science. *Geoderma* 378: 114588. hal-02917327
4. Ayrault S., Meybeck M., Mouchel J.-M., Gaspéri J., Lestel L., Lorgeoux C., Boust D. (2020) Sedimentary Archives Reveal the Concealed History of Micropollutant Contamination in the Seine River Basin. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 1-32 https://doi.org/10.1007/698_2019_386
5. Ballini M., Chautard C., Nos J., Phrommavanh V., Beaucaire C., Besancon C., Boizard A., Cathelineau M., Peiffert C., Vercouter T., Vors E., Descostes M. (2020) A multi-scalar study of the long-term reactivity of uranium mill tailings from Bellezane site (France). *Journal of Environmental Radioactivity*, 218, 106223
6. Barre G., Strzeczynski P., **Michels R.**, Guillot S., Cartigny P., Thomassot E., Lorgeoux C., Assayag N. Truche L. (2020) Tectono-metamorphic evolution of an evaporitic décollement as recorded by mineral and fluid geochemistry: the "Nappe des Gypses" (Western Alps) case study. *Lithos*, 358-359, 105419
7. **Beauloye, Y., Deshaies, M., Gunzburger, Y.** (2020) Conditions for the territorial anchorage of a natural gas exploitation project. *The Extractive Industries and Society*. 10.1016/j.exis.2020.04.005
8. Bouzoudja, R., Bechet, B., Hanzlikova, J., Sněhota, M., Le Guern, C., Capiiaux, H., Jean-Soro, L., Claverie, R., Joimel, S., **Schwartz, C.**, Guénon, R., Szkordilis, F., Körmöndi, B., Musy, M., Cannavo, P., Lebeau, T. (2020) Simplified performance assessment methodology for addressing soil quality of nature-based solutions. *Journal of Soils and Sediments*. hal-02926120
9. Caulk R., **Scholtès L.**, Krzaczek M., Chareyre B. (2020) A pore-scale thermo-hydro-mechanical model for particulate systems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 372, 113292
10. Chalot, M., Girardclos, O., Ciadamidaro, L., Zappellini, C., **Yung, L.**, Durand, A., Pfindler, S., Lamy, I., Driget, V., **Blaudez, D.** (2020) Poplar rotation coppice at a trace element-contaminated phytomanagement site: A 10-year study revealing biomass production, element export and impact on extractable elements. *Science of the Total Environment* 699: 134260. hal-02355647
11. Chauve T., **Scholtès L.**, Donzé F.-V., Mondol N. H., Renard F. (2020) Layering in shales controls microfracturing at the onset of primary migration in source rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, 5
12. Coarita-Tintaya D., **Golfier F.**, Souley M. and Vu M. N. (2020) Anisotropic hydro-viscoplastic modeling of a drift at the Meuse/Haute-Marne URL. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1797887>
13. Colombini, G., Auclerc, A., Watteau, F. (2020) Technomoder: A proposal for a new morpho-functional humus form developing on Technosols revealed by micromorphology. *Geoderma* 375: 114526. hal-02972163
14. Coarentin P., Deconinck J.-F., Pellenard P., Amédéo F., Bruneau L., **Chenot E.**, Matrion B., **Huret E.**, Landrein P. (2020) Environmental and climatic controls of the clay mineralogy of Albian deposits in the Paris and Vocontian basins (France). *Cretaceous Research*, 108, 104342
15. Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Egendorf, S. P., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D., L., Walsh, D., Morin, T., **Séré, G.** (2020) Using constructed soils for green infrastructure - challenges and limitations. *Soil* 6(2): 413-434. hal-02933594
16. Gocel-Chalté, D., Guerold, F., Knapp, H. et **Robin, V.**, 2020. Anthracological analyses of charcoal production sites at a high spatial resolution: the role of topography in the historical distribution of tree taxa in the northern Vosges mountains, France. *Veget Hist Archaeobot*. <https://doi.org/10.1007/s00334-020-00769-z>
17. Jaber J., **Conin M., Deck O.**, Moumni M., Godard O., Kenzari S. (2020) Investigation of the Mechanical Behavior of 3D Printed Polyamide-12 Joints for Reduced Scale Models of Rock Mass. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 2687-2705
18. Lafortune S., Gombert P., Pokryszka Z., Lacroix E., **de Donato P.**, Jozja N. (2020) Monitoring Scheme for the Detection of Hydrogen Leakage from a Deep Underground Storage. Part 1: On-Site Validation of an Experimental Protocol via the Combined Injection of Helium and Tracers into an Aquifer. *Applied Sciences*, 10 (17) 6058
19. Lapie, C., Sterckeman, T., Paris, C., Leglize, P. (2020) Impact of phenanthrene on primary metabolite profiling in root exudates and maize mucilage. *Environmental Science and Pollution Research* 27(3): 3124-3142. hal-02934626
20. Mosser-Ruck R., Sterpenich J., Michau N., Jodin-Caumon M.-C., **Randi A.**, Abdelmoula M., Barres O., Cathelineau M. (2020) Serpentinization and H₂ production during an iron-clay interaction experiment at 90C under low CO₂ pressure. *Apply Clay Science*, 191 105609
21. **Ols, C.**, Hervé, J.-C., **Bontemps, J.-D.**, 2020. Recent growth trends of conifers across Western Europe are controlled by thermal and water constraints and favored by forest heterogeneity. *Science of the Total Environment* 742 (2020) 140453 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140453>
22. Rees, F., Sterckeman, T., T., Morel, J. L. (2020) Biochar-assisted phytoextraction of Cd and Zn by *Noccaea caerulea* on a contaminated soil: A four-year lysimeter study. *Science of the Total Environment* 707: 135654. hal-02614581

23. Ryzhkova, N., Pinto, G., Kryshen, A., Bergeron, Y., **Ols, C.**, Drobyshev, I., 2020. Multi-century reconstruction suggests complex interactions of climate and human controls of forest fire activity in a Karelian boreal landscape, North-West Russia. *Forest Ecology and Management*, 459, (1 march 2020) 117770 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117770>
24. Schuh-Senlis M., Thieulot C., Cupillard P., **Caumon G.** (2020) Towards the application of Stokes flow equations to structural restoration simulations. *Solid Earth*, 11, 1909-1930
25. Ulrich M., Muñoz M., Boulvais P., Cathelineau M., Cluzel D., Guillot S., Picard C. (2020) Serpentinization of New Caledonia peridotites: from depth to (sub-) surface. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175-91
26. Wechtler, L., Henry, S., Falla, J., Walderdorff, L., Bonnefoy, A., Laval-Gilly, P. (2020) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) dissipation from a contaminated technosol composed of dredged sediments with *Miscanthus x giganteus* and *Trifolium repens* L. in mono - and co-culture. *Journal of Soils and Sediments* 20(7): 2893-2902. hal-02960284
27. **Yung L, Blaudez D**, Maurice N, Azou-Barré A, **Sirguey C.** (2020). Dark septate endophytes isolated from non-hyperaccumulator plants can increase phytoextraction of Cd and Zn by the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens*. Accepted by *Environmental Science and Pollution Research* (20.11.2020)
6. Barot, S., L. Abbadie, A. Auclerc, C. Barthélémy, E. Béville, P. Billet, P. Clergeau, J.-N. Consales, M. Deschamp-Cottin, A. David, C. Devigne, V. Dham, Y. Dusza, A. Gaillard, E. Gonzalez, M. Hédont, D. Labarraque, A.-M. Le Bastard, J.-L. Morel, Y. Petit-Berghem, E. Rémy, E. Rochelle-Newall and M. Veyrières (2019). «Urban ecology, stakeholders and the future of ecology.» *Science of The Total Environment* 667: 475-484.
7. **Beauloye Y.** (2019), «De la fin des HBL à l'avènement de l'Euro-district Saar-Moselle, une image à reconstruire», in Pascal Raggi (dir.), *Un après-mine imprévu. Entre craintes et attentes, quand l'exploitation du sous-sol redevient d'actualité en Lorraine*, Nancy, PUN, 2019, p. 69-96.
8. **Beauloye Y.** (2019), «L'acceptabilité sociale d'un projet industriel», in Pascal Raggi (dir.), *Un après-mine imprévu. Entre craintes et attentes, quand l'exploitation du sous-sol redevient d'actualité en Lorraine*, Nancy, PUN, 2019, p. 97-110.
9. Benioug M., **Golfier F.**, Fischer P., Oltean C., Buès M.A., Yang X., 2019, Interaction between biofilm growth and NAPL remediation: A pore-scale study, *Advances in Water Resources*, 125, 82-97
10. Blanchart, A., J. N. Consalès, **G. Séré** and **C. Schwartz** (2019). «Consideration of soil in urban planning documents—a French case study.» *Journal of Soils and Sediments* 19(8): 3235-3244.
11. Bonnaud, P; Santenoise, P; Tisserand, D; Nourrisson, G; Ranger, J. 2019. Impact of compaction on two sensitive forest soils in Lorraine (France) assessed by the changes occurring in the perched water table. *Forest Ecology And Management* 437 380:395
12. Boulangé M., Lorgeoux C., Biache C., Michel J., **Michels R., Faure P.** (2019) Aging as the main factor controlling PAH and polar-PAC (polycyclic aromatic compound) release mechanisms in historically coal-tar-contaminated soils. *Environ Sci Pollut Res Int*, 26(2) 1693-1705
13. Bourdet J., Kempton R. H., Dyja-Person V., **Pironon J.**, Gong S., Ross A. S. (2019) Constraining the timing and evolution of hydrocarbon migration in the Bight Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 114, 104-193
14. Brodsky E. E., Mori J. J., Anderson L., Chester F. M., **Conin M.**, et al., 2019, The State of Stress on the Fault Before, During, and After a Major Earthquake, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48
15. Chopard A., Marion Ph., Mermillod-Blondin R., Plante B., Benzaazoua M. (2019) Environmental Impact of Mine Exploitation: An Early Predictive Methodology Based on Ore Mineralogy and Contaminant Speciation. *Minerals*, 9(7), 397
16. N. Clausolles, P. Collon, **G. Caumon.** (2019) Generating variable shapes of salt geobodies from seismic images and prior geological knowledge. *Interpretation*, SAGE Publications, 2019, 7 (4), pp.829 - 841. 10.1190/INT-2019-0032.1. hal-02331647
17. Davit Y., **Golfier F.**, Latché J.C., Quintard M., 2019, A domain

2019 - 66 publications

1. **Agnoletti, M.-F.** (2019). Effet de la pratique sur les représentations sociales : l'exemple du renouveau minier en Lorraine. In P.Raggi (Ed.). *Un après-mine imprévu. Entre craintes et attentes, quand l'exploitation du sous-sol redevient d'actualité en Lorraine*, pp.115-132. Nancy : Éditions Universitaires de Lorraine.
2. Akroume, E; Maillard, F; Bach, C; Hossann, C; Brechet, C; Angeli, N; Zeller, B; **Saint-Andre, L.**; Buee, M., 2019. First evidences that the ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus* mobilizes nitrogen and carbon from saprotrophic fungus necromass. *Environmental Microbiology* 21(1) 197:208
3. Allory, V., A. Cambou, P. Moulin, **C. Schwartz**, P. Cannavo, L. Vidal-Beaudet and B. G. Barthès, 2019. Quantification of soil organic carbon stock in urban soils using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in situ or in laboratory conditions. *Science of The Total Environment*, 686, 764-773.
4. Anquez P., Pellerin J., Irakarama M., Cupillard P., Lévy B., **Caumon G.**, 2019, Automatic correction and simplification of geological maps and cross-sections for numerical simulations, *Comptes rendus Geoscience*, in print
5. Bahnan A. E., Carpentier C., **Pironon J.**, Ford M., Ducoux M., Barré G., Mangenot X., Gaucher E.C., 2019, Impact of geodynamics on fluid circulation and diagenesis of carbonate reservoirs in a foreland basin: Example of the Upper Lacq reservoir (Aquitaine basin, SW France), *Marine and petroleum geology*, 111, 676-694

- decomposition approach to finite-epsilon homogenization of scalar transport in porous media, *SIAM Journal on applied Mathematics*, 79 (5),
18. Deng, T.-H.-B., Tang, Y.-T., Sterckeman, T., Echevarria, G., Morel, J.-L., Qiu, R.-L. (2019) Effects of the interactions between nickel and other trace metals on their accumulation in the hyperaccumulator *Noccaea caerulea*. *Environmental and Experimental Botany* 158: 73-79. hal-02154555
 19. De Santis F., Contrucci I., Kinscher J., Bernard P., Renaud V., **Gunzburger Y.** (2019) Impact of Geological Heterogeneities on Induced-Seismicity in a Deep Sublevel Stopping Mine. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 697-717
 20. **Deshaies M.** (2019), «Les bassins houillers européens : déclin, problèmes et potentiels de régions post-minières», in Pascal Raggi (dir.), *Un après-mine imprévu. Entre craintes et attentes, quand l'exploitation du sous-sol redevient d'actualité en Lorraine*, Nancy, PUN, 2019, p. 15-42.
 21. Durante, S; Augusto, L; Achat, DL; Legout, A; Bredoire, F; Ranger, J; Seynave, I; Jabiol, B; Pousse, N. 2019. Diagnosis of forest soil sensitivity to harvesting residues removal - A transfer study of soil science knowledge to forestry practitioners. *ECOLOGICAL INDICATORS* 104 512:523
 22. Edjossan-Sossou A. M., Galvez D., **Deck O.**, Al Heib M., Verdel T., Dupont L., Chery O., Camargo M., Morel L., 2019, Sustainable risk management strategy selection using a fuzzy multi-criteria decision approach, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 45, 101474
 23. El Kahi E., **Deck O.**, Khouri M., Mehdizadeh R., P. Rahme P., 2019, Étude de l'influence de la plasticité du sol sur la transmission des mouvements du sol affectant l'interaction sol-structure, *Revue Française de Géotechnique*, 156,
 24. El Kahi E., **Deck O.**, Khouri M., Mehdizadeh R., Rahme P., 2020, A new simplified meta-model to evaluate the transmission of ground movements to structures integrating the elastoplastic soil behavior, *Structures*, 23, 324-334
 25. Godefroy G., **Caumon G.**, Laurent G., Bonneau F., 2019, Structural Interpretation of Sparse Fault Data Using Graph Theory and Geological Rules, *Mathematical geosciences*, 1-17
 26. Gschwantner, T., ...Hervé, J.-C.,... **Bouriaud, O.**, et al. Harmonisation of stem volume estimates in European National Forest Inventories. *Annals of Forest Science* (2019) 76:24.
 27. Hedde, M., J. Nahmani, **G. Séré**, A. Auclerc and J. Cortet (2019). «Early colonization of constructed Technosols by macro-invertebrates.» *Journal of Soils and Sediments* 19(8): 3193-3203.
 28. van der Heijden, G; Hinz, A; Didier, S; Nys, C; Dambrine, E; Legout, A. 2019. Quantifying the Uncertainty in Modeled Water Drainage and Nutrient Leaching Fluxes in Forest Ecosystems. *ECOSYSTEMS* 22(3) 677:698
 29. Irulappa-Pillai-Vijayakumar DB, **Renaud J.-P.**, Morneau F, McRoberts RE, Vega C. Increasing precision for the French forest inventory estimates using the k-NN technique with optical and photogrammetric data and model-assisted estimators. *Remote Sensing* (2019) 991.
 30. Laurent G., Izart C., Lechenard B., **Golfier F.**, Marion P., Collon P., Truche L., Royer J.J., Filippov L., 2019, Numerical modelling of column experiments to investigate in-situ bioleaching as an alternative mining technology, *Hydrometallurgy*, 188, 272-290
 31. Lalan P., Dauzères A., De Windt L., Sammaljärvi J., Bartier D., Techer I., Detilleux V., Siitari-Kaupic M. (2019) Mineralogical and microstructural evolution of Portland cement paste/argillite interfaces at 70 °C - Considerations for diffusion and porosity properties. *Cement and Concrete Research*, 115, 414-425
 32. Lapie, C., Leglize, P., Paris, C., Sterckeman, T., Buisson, T. (2019) Profiling of main metabolites in root exudates and mucilage collected from maize submitted to cadmium stress. *Environmental Science and Pollution Research* 26(17): 17520-17534. hal-02265520
 33. Lemaire J., Mora V., **Faure P.**, Hanna K., Buès M., Simonnot M.O (2019) Chemical oxidation efficiency for aged, PAH-contaminated sites: An investigation of limiting factors . *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103061
 34. Maillard, F; Leduc, V; Bach, C; Goncalves, JLD; Androte, FD; **Saint-Andre, L.**; Laclau, JP; Buee, M; Robin, A. 2019. Microbial Enzymatic Activities and Community-Level Physiological Profiles (CLPP) in Subsoil Layers Are Altered by Harvest Residue Management Practices in a Tropical *Eucalyptus grandis* Plantation. *Microbial Ecology* 78(2) 528:533
 35. Maillard, F; Leduc, V; Bach, C; Reichard, A; Fauchery, L; **Saint-Andre, L.**; Zeller, B; Buee, M. 2019. Soil microbial functions are affected by organic matter removal in temperate deciduous forest. *Soil Biology & Biochemistry* 133 28:36
 36. Mao, Z; **Derrien, D.**; Didion, M; Liski, J; Eglin, T; Nicolas, M; Jonard, M; **Saint-Andre, L.** (2019) Modeling soil organic carbon dynamics in temperate forests with Yasso07. *Biogeosciences* 16(9) 1955:1973
 37. Martz P., Mercadier J., Cathelineau M., Boiron M.C., Quirt D., Doney A., Gerbeaud O., De Wally E., Ledru P. (2019) Formation of U-rich mineralizing fluids through basaline brine migration within basement-hosted shear zones: A large-scale study of the fluid chemistry around the unconformity-related Cigar Lake U deposit (Saskatchewan, Canada). *Chemical Geology*, 508, 116-143
 38. Muñoz M., Ulrich M., Cathelineau M., Mathon O. , 2019, Weathering processes and crystal chemistry of Ni-bearing minerals in saprock horizons of New Caledonia ophiolite, *Journal of Geochemical Exploration*, 198, 82-99
 39. Myagkiy A., **Golfier F.**, Truche L., Cathelineau M. , 2019, Reactive transport modeling applied to Ni laterite ore deposits in New Caledonia: Role of hydrodynamic factors and geological structures in Ni mineralization, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 1425-1440
 40. Nadi B., Askari F., Farzaneh O., Fatolahzadeh S., Mehdizadeh R. (2019) Reliability Evaluation of Regression Model for

- Estimating Co-seismic Landslide Displacement. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 44, 165-173
41. Naylo, A., S. I. Almeida Pereira, L. Benidire, H. El Khalil, P. M. L. Castro, S. Ouvrard, **C. Schwartz** and A. Boularbah (2019). «Trace and major element contents, microbial communities, and enzymatic activities of urban soils of Marrakech city along an anthropization gradient.» Journal of Soils and Sediments 19: 2153-2165.
42. Nicolitch, O; Feucherolles, M; Churin, JL; Fauchery, L; **Turpault, M.-P.**; Uroz, S. 2019. A microcosm approach highlights the response of soil mineral weathering bacterial communities to an increase of K and Mg availability. Scientific Reports 9
43. Nkrumah, P. N., Echevarria, G., Erskine, P. D., Chaney, R. L., Sumail, S., Van Der Ent, A. (2019) Soil amendments affecting nickel uptake and growth performance of tropical 'metal crops' used for agromining. Journal of Geochemical Exploration 203: 78-86. hal-02628013
44. Nkrumah, P. N., Tisserand, R., Chaney, R. L., Baker, A. J. M., Morel, J.-L., Goudon, R., Erskine, P. D., Echevarria, G., Van Der Ent, A. (2019) The first tropical 'metal farm'. Journal of Geochemical Exploration 198: 114-122. hal-02154553
45. Ouvrard B., Abildtrup J., Bostedt G., Stenger A. (2019). Determinants of forest owners attitudes towards wood ash recycling in Sweden - Can the nutrient cycle be closed? Ecological Economics, Volume 164
- 46. Plain, C.**; Ndiaye, FK; Bonnaud, P; Ranger, J; Epron, D. (2019) Impact of vegetation on the methane budget of a temperate forest. NEW PHYTOLOGIST 221(3) 1447:1456
47. Petrova V. A., Lespinasse M., Poluektova V. V., Ustinova S. A., Minaeva V. A., 2019, Scale Effect in a Fluid-Conducting Fault Network, Geology of Ore Deposits
48. Privalov V., **Randi A.**, Sterpenich J., **Pironon J.**, Morlot C., 2019, Structural Control of a Dissolution Network in a Limestone Reservoir Forced by Radial Injection of CO₂ Saturated Solution: Experimental Results Coupled with X-ray Computed Tomography, Geosciences, 9, 33
49. Raguenel M., Driesner T., Bonneau F. (2019) Numerical modeling of the geothermal hydrology of the Volcanic Island of Basse-Terre, Guadeloupe. Geothermal Energy, 7, 28
50. Rees, F., R. Dagois, **D. Derrien**, J.-L. Fiorelli, F. Watteau, J. L. Morel, **C. Schwartz**, M.-O. Simonnot and **G. Séré** (2019). Storage of carbon in constructed technosols: in situ monitoring over a decade. Geoderma, 337, 641-648.
51. Rodrigues, J., A. Gérard, **G. Séré**, J.-L. Morel, S. Guimont, M.-O. Simonnot and M.-N. Pons (2019). Life cycle impacts of soil construction, an innovative approach to reclaim brownfields and produce nonedible biomass. Journal of Cleaner Production, 211, 36-43.
52. Rue, M., Rees, F., Simonnot, M.-O., Morel, J. L. (2019) Phytoextraction of Ni from a toxic industrial sludge amended with biochar. Journal of Geochemical Exploration 196: 173 - 181. hal-01934269
- 53. Saint-André L.**, Buee M., Aubert M., Richter C., Deleuze C., Rakotoarison A., Abildtrup J., Akroume E., Bach C., Berthe T., Bilot N., Bouvet A., Chauvat M., Dreyfus P., Echevarria G., Elie F., Fauchery L., Fuente Tomai P., Gerant D., Lauvin D., Leban JM., Leblanc M., Leduc V., Maillard F., Normand M., Quibel E., Raveloson C., Renaud JP., Roy SR., Stenger-Letheux A., Viaud P., Vincenot L., Zeller B.B. (2019). RESPIRE - Récolte des menus bois en forêt - Potentiel, Impact, Indicateurs et remédiations par épandage de cendres de bois. [Rapport de recherche] ADEME. 2019.
- 54. Sohnle Jochen** (ed./dir.), Environmental Constitutionalism: What impact on Legal Systems? - Le constitutionnalisme environnemental : quel impact sur les systèmes juridiques ?, P.I.E. Peter Lang, Bruxelles, 2019 (239 pages).
- 55. Sohnle Jochen**, « Le droit international de la mer au défi des mouvements : De la pertinence normative des flux et dynamiques », dans le cadre dossier L'Océan au-delà des juridictions nationales: la dernière frontière ?, sous la direction d'Agnès MICHELOT, Revue juridique de l'environnement, 2019, p. 243-254.
56. Sterckeman, T., Cazes, Y., **Sirguey, C.** (2019) Breeding the hyperaccumulator *Noccaea caerulea* for trace metal phytoextraction: first results of a pure-line selection. International Journal of Phytoremediation 21(5): 448-455. hal-02628022
57. Sterckeman, T., Gossiaux, L., Guimont, S., **Sirguey, C.** (2019) How could phytoextraction reduce Cd content in soils under annual crops? Science of the Total Environment 654: 751-762. hal-02154554
58. Tinet A.-J., Collon P., Philippe C., Dewaide, L., Hallet V., 2019, OM-MADE: An Open-Source Program to Simulate One-Dimensional Solute Transport in Multiple Exchanging Conduits and Storage Zones, Computers & Geosciences, 127, 23-35
- 59. Turpault, M.-P.; Calvaruso, C.**; Dincher, M; Mohammed, G; Didier, S; **Redon, P.-O.**; Cochet, C. 2019. Contribution of carbonates and oxalates to the calcium cycle in three beech temperate forest ecosystems with contrasting soil calcium availability. Biogeochemistry 146(1) 51:70
60. Verron H., Sterpenich J., Bonnet J., Bourdelle F., Mosser-Ruck R., Lorgeoux C., **Randi A.**, Michau N., 2019, Experimental Study of Pyrite Oxidation at 100° C: Implications for Deep Geological Radwaste Repository in Claystone, Minerals, 9, 427
61. Vignerresse J.L., Truche L., **Richard A.** (2019) How do metals escape from magmas to form porphyry-type ore deposits? Ore Geology Reviews, 105, 310-336
62. Walter B., Géraud Y., Hautevelles Y., Diraison M., Raison F., 2019, Fluid Circulations at Structural Intersections through the Toro-Bunyoro Fault System (Albertine Rift, Uganda): A Multidisciplinary Study of a Composite Hydrogeological System, Geofluids,
63. Watteau, F., Jangorzo, N. S., **Schwartz, C.** (2019) A micromorphological analysis for quantifying structure descriptors in a young constructed Technosol. Boletín de la

- Sociedad Geológica Mexicana 71(1): 11-20. hal-02154593
64. Wechtler, L., Laval-Gilly, P., Bianconi, O., Walderdorff, L., Bonnefoy, A., Falla-Angel, J., Henry, S. (2019) Trace metal uptake by native plants growing on a brownfield in France: zinc accumulation by *Tussilago farfara* L. *Environmental Science and Pollution Research* 26(35): 36055-36062. hal-02960281
 65. Zhang L., Nasika C., Donzé F.-V., Zheng X., Renard F., **Scholtès L.**, 2019, Modeling Porosity Evolution Throughout Reaction-Induced Fracturing in Rocks With Implications for Serpentinization, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,
 66. Zerrouki A. A., Géraud Y., Diraison M., Baddari K., 2019, A Preliminary study of relationships between thermal conductivity and petrophysical parameters in Hamra Quartzites reservoir, Hassi Messaoud field (Algeria), *Journal of African Earth Sciences*, 151, 461-471

Communications scientifiques

1. ADISAPUTRO, D., de Donato, P., Saint-André, L., 2019. Metrology, monitoring and modelling of gases transport processes within the system of pedosphere/biosphere. Chapman conference, San Diego, Californie, USA, 26 aout 2019.
2. BEAULOYE Y. & DESHAIES M. (2018), Possibilities and conditions for a new form of extractive activity in the Lorraine Coalfield (France). Congrès AAG (Association of American Geographers), La Nouvelle Orléans, 12 avril 2018.
3. BEAULOYE Y. (2018), Coal gas: a lever for a potential revitalization of the former French Lorrain coalfield/coal basin. Congrès RFG (Resource for Future Generation), Vancouver, 21 juin 2018.
4. BEAULOYE Y. (2018), Limits and difficulties of a new mining project in the former coal basin of Lorraine. Colloque TRAMINES (université de Chambéry), 17 octobre 2018.
5. BEAULOYE Y. & DESHAIES M. (2019), Conversion of the former cross-border Coalfield of Lorraine (France) and Saarland. Congrès AAG (Association of American Geographers), Washington, 4 avril 2019
6. BRAS, N., PLAIN, C., EPRON, D. (2020) Soil methane consumption in a temperate oak forest responds to soil water status but is not related to stand age. EGU, en ligne, 4 mai 2020
7. BRAS, N., PLAIN, C., DUMARCAY, S., EPRON, D. (2020) Interactive effect of tree species and soil organic layer thickness on methane consumption. AGU, en ligne, 7 décembre 2020
8. DESHAIES M. (2018), The exploitation of lignite in Germany, or how to make acceptable a devastating and contested activity? Congrès RFG (Resource for Future Generation), Vancouver, 21 juin 2018.
9. DESHAIES M. (2018), Remediation of mining and industrial Heritage and cross-border development in Saar-Lorraine Coal Basin. Colloque TRAMINES (université de Chambéry), 17 octobre 2018.
10. EPRON, D. and PLAIN, C. Contribution of vegetation to methane emission produced in the soil of an upland forest: a $^{13}\text{CH}_4$ -labelling approach, JpGU - AGU joint meeting, Online, 12-16 July 2020
11. EPRON, D. and PLAIN, C. Methane budget of a temperate forest: the underestimated contribution of understorey vegetation, JpGU - AGU joint meeting 2020, Online, 12-16 July 2020.
12. ISNARDON M. & DESHAIES M. (2019), The radioactive waste storage project in northeastern France: an opportunity to develop the territory? Congrès AAG (Association of American Geographers), Washington, 4 avril 2019.
13. OLIVEIRA C., DEVIN S. & ROBIN V. (2019), Charcoal and coal: charcoal: energy resources with a strong impact on the past environment and ongoing stakes for energy transition. International Anthracology meeting (Anthraco2019), Liverpool, 18 septembre 2019
14. OLIVEIRA C., HERRAULT P.-A., ROBIN V. & DEVIN S. (2019), Automatic detection of ancient charcoal production platforms through LiDAR observations: is it an effective method? International Anthracology meeting (Anthraco2019), Liverpool, 18 septembre 2019
15. OLIVEIRA C, ARAVECCHIA S, MAY L, PRADALIER C, ROBIN V & DEVIN S. (2020) "Towards an automatic detection of charcoal production platforms in airborne LiDAR images". 5^{ème} colloque des Zones Ateliers-CNRS
16. EPRON, D. and PLAIN, C.: Contribution of vegetation to methane emission produced in the soil of an upland forest: a $^{13}\text{CH}_4$ -labelling approach, EGU General Assembly 2020, Online, 4-8 May 2020
17. REYPE, C., STOICA, R. et al. Bayesian statistical analysis of hydrogeochemical data using point processes: a new tool for source detection in multicomponent fluid mixtures. RING meeting 8 septembre 2020, Nancy.

DEEPSURF

Indicateurs | Effet levier

Dans cette section effet levier, nous allons distinguer

- Le développement économique direct ou indirect en lien avec le projet,
- Les nouvelles collaborations, académiques ou partenariales, qui peuvent être interdisciplinaires,
- Le montage d'autres projets de recherche,
- Les financements extérieurs.

Développement économique

Une collaboration DEEPSURF entre la start-up 45_8 Energy et plusieurs équipes de DEEPSURF (cf. nouvelles collaborations pour les détails) s'est développée dans le cadre du projet et a engendré le recrutement d'un project manager dédié au sein de la société.

Trois autres start-up ont été récemment créées sur des thématiques portées par DEEPSURF :



ENEREX SAS, Expertise in New Energy and Resources Exploration, porté par M. Lionel Bertrand, ancien doctorant à GeoRessources. Dans un contexte de multiplication des projets de transition énergétique et de développement des

énergies renouvelables, ENEREX répond aux besoins croissants des opérateurs industriels pour la réalisation d'études de prospections géologiques, d'identification et de caractérisation des réservoirs, en particulier dans le domaine de la géothermie haute température.



Tessael SAS, porté par M. Wan Chiu Li, dit Ben, ancien chercheur à l'INRIA et à GeoRessources et ingénieur chez Emerson. Tessael est une société au service des industries du secteur minier ainsi que du secteur de la transition énergétique tel que le stockage géologique de CO₂ et la géothermie. Elle propose

différents types de licences d'utilisateur de GeoO₂, des licences d'intégration de GeoO₂ dans une suite de logiciels tiers ainsi que des projets de conseil en développement de logiciels (audit et développement de code).



Geode-solutions

Geode-solutions, porté par MM. Pierre Anquez et Arnaud Botella, anciens doctorants à GeoRessources. Pour faire sauter le verrou de l'adaptation entre les modèles géologiques et les solveurs physiques, Geode-solutions propose des solutions logicielles et des prestations sur-mesure qui vont répondre à ces besoins.



Un projet de recherche financé par la Région Grand Est et l'Union Européenne (FEDER), Regalor (Ressources Gazières en Lorraine), implique des acteurs communs avec DEEPSURF. Il s'agit notamment des laboratoires

GeoRessources, LOTERR, CRULH et PErSEUs ainsi que de la société La Française de l'Énergie. Ce projet vise à étudier l'exploitabilité du gaz de charbon dans le bassin houiller lorrain. L'un des objectifs principaux est la mise en place d'une plateforme européenne de R&D sur l'étude du sous-sol à finalité énergétique. Cette dernière pourra être située sur le site pilote de DEEPSURF mis à disposition par la société la Française de l'Énergie (LFDE) : un forage de 1000 mètres de profondeur sur la commune de Folschviller. De par les acteurs et thématiques communs avec DEEPSURF, ainsi que les coïncidences calendaires, les deux projets de recherche auront des liens forts.



Forage sur le site pilote DEEPSURF et Regalor sur la commune de Folschviller en Moselle

DEEPSURF

Indicateurs | Effet levier

Interdisciplinarité

Le projet DEEPSURF est un cadre qui permet de nouvelles interactions entre disciplines décrites dans le tableau ci-dessous. Certaines qui se situent entre plusieurs laboratoires et/ou plusieurs partenaires sont souvent des nouvelles collaborations.

Type d'action	Intitulé	Laboratoire et/ou partenaires	Disciplines	Financement
Thèse de Yann Beauloye	L'ancrage territorial d'un projet d'exploitation de gaz de charbon au sein d'un espace en mutation : l'ancien bassin houiller lorrain	LOTERR, GeoRessources	Géographie, aménagement du territoire, urbanisme, sciences de la Terre	DEEPSURF
Thèse de Didi Adisaputro	Météorologie, monitoring et modélisation des processus de transfert des gaz CO ₂ et CH ₄ au sein du système géosphère / biosphère (- 20/+ 10 m)	GeoRessources, BEF	Géosciences, sciences du sol, sciences forestières	DEEPSURF
Thèse de 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	LSE, BETA	Pédologie, écologie, économie	DEEPSURF
Thèse de Christophe Reype	Estimation simultanée des paramètres et détection de structures dans les données spatialisées	IECL, GeoRessources	Mathématiques appliquées, géosciences	DEEPSURF
Thèse de Jeanne Touche	Effet de la sécheresse sur le fonctionnement biogéochimique d'un écosystème forestier	BEF, GeoRessources	Sciences forestières, géosciences	DEEPSURF
Thèse de Mohammad Iktham bin Taher	Nouveaux capteurs de type HEMT pour l'analyse biogéochimique in-situ	GeoRessources, Institut Lafayette, 45_8 Energy, Solexperts	Géosciences, sciences des matériaux, électronique	DEEPSURF
Post-doctorat de Rouba Alrammouz	Nouvelle technologie microélectronique de capteurs pour la détection d'un flux d'Hélium	GeoRessources, Institut Lafayette, 45_8 Energy	Sciences des matériaux, géosciences, électronique	DEEPSURF 50 % Institut Lafayette 25 % 45_8 Energy 25%
Post-doctorat de Clémentine Chirol	COSMOS : compromis et optimisation des services écosystémiques rendus par les sols	LSE, BEF, ANDRA, ONF	Pédologie, écologie, sciences forestières, économie	DEEPSURF 50% ANDRA 50%
Post-doctorat en cours de recrutement	Woodstock - Reconstruction historique des stocks et flux de bois	Silva, LOTERR, BEF, LIF, LIEC	Écologie forestière, géohistoire	DEEPSURF 75 % Région Grand Est 25 %
Partenariat	Impression 3D des blocs des fractures et blocs fracturés pour le développement du dispositif DIMITRI	GeoRessources, Société Platinum 3D		DEEPSURF - Thèse Emilio Abi Aad
Collaboration scientifique académique		IECL (Radu Stoica), GeoRessources, équipe RING (Guillaume Caumon)		DEEPSURF

Effet levier - Financements extérieurs

L'effet levier de DEEPSURF se mesure également :

- Par le financement extérieur de certaines actions de recherche du projet, à ce titre un nombre important de post-docs sont co-financés (Tab. 1).
- Par le financement extérieur d'actions de recherche en lien avec les thématiques du projet et portées par des membres de la communauté DEEPSURF (Tab. 2).
- Ainsi que par le montage de projets à partir de la communauté scientifique constituée dans le cadre de DEEPSURF et sur des thématiques explorées dans le projet (Tab. 3).

Tableau 1 - Financement extérieur d'actions de recherche DEEPSURF

Type d'action	Intitulé de l'action	Financement
Thèse de Manuel Isnardon (LOTERR)	Impact et ancrage du projet Cigéo dans la région Grand Est	ANDRA 100 %
Post-doctorat de Clémentine Ols (LIF)	RESFORCLIM : Suivi instantané et tendanciel de l'acquisition des ressources forestières françaises face au changement climatique	DEEPSURF 50 % IGN 25 % Labex Arbre 25 %
Post-doctorat d'Amélie Cavelan (LIEC)	Impact des variations du niveau des nappes phréatiques liées au changement climatique sur la remobilisation des polluants organiques	DEEPSURF 50 % BRGM 50 %
Post-doctorat de Rouba Alrammouz (GeoRessources)	Nouvelle technologie de capteurs micro-électroniques pour les applications de mesures de terrain de flux d'Hélium	DEEPSURF 50 % Institut Lafayette 25 % 45_8 Energy 25 %
Post-doctorat de Clémentine Chirol (LSE)	COSMOS : compromis et optimisation des services écosystémiques rendus par les sols	DEEPSURF 50 % ANDRA 50 %
Post-doctorat (J.-L. Dupouey et X. Rochel)	Woodstock - Reconstruction historique des stocks et flux de bois	DEEPSURF 75 % Région Grand Est 25 %

DEEPSURF

Indicateurs | Effet levier

Tableau 2 - Financement extérieur d'actions de recherche en lien avec les thématiques de DEEPSURF

Type d'action	Intitulé de l'action	Financement
Thèse (BEF) - octobre 2019	Étude multi-sites (SOERE - Forêt, France) de la réponse et résilience de la fertilité chimique des écosystèmes forestiers dans un contexte de changement (dépôts atmosphériques et substitution d'essence)	INRAE - ONF
Thèse CIFRE de G. Hostyn (LSE) - octobre 2019	Influence des matériaux grossiers sur les potentialités agronomiques des sols pollués industriels.	BURGEAP
Thèse CIFRE de J. Jacquet (LSE) - octobre 2020	Analyse du comportement des hyperaccumulateurs en conditions polymétalliques pour le développement d'une agromine durable sur sites industriels.	ECONICK
Thèse (BEF) - fin 2020	Translocations des éléments minéraux dans les arbres	INRAE - Groupama
Thèse CIFRE (GeoRessources) - janvier 2021	Caractérisation du système géologique de l'Hélium en Europe Continentale - Évaluation du potentiel exploratoire de la ressource	45_8 Energy
Post-doctorat (G. Caumon et R. Stoica) - 1 ^{er} semestre 2021	Un nouveau modèle probabiliste pour la modélisation stochastique des réseaux de failles	RING
Financement d'un ingénieur d'étude	Développement de capteurs à adapter à la grande presse triaxiale (DIMITRI) - thèse Émilio Abi Aad	Filière Carnot Extra&Co

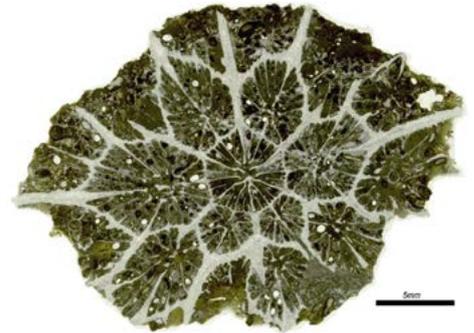
Tableau 3 - Montage de projets dans le cadre de DEEPSURF

Type de projet et consortium	Intitulé du projet	Financement
Projet de recherche - 2020 Partenaires : 45_8 Energy, Institut Lafayette, Solexperts, GeoRessources	Projet Hy-O-T : dispositif IoT de détection de gaz pour des applications dans l'exploration d'hydrogène natif et d'hélium, le stockage de CO ₂ , la production et le stockage de CH ₄	AMI Numérique Région Grand Est / FEDER
Projet de recherche partenariale (INTRA - Carnot) - 2020 Partenaires : GeoRessources, LIEC, Kapflex, Tauw France et BRGM	Projet LNAPL RTMS : développement d'un prototype de capteur environnemental permettant le suivi en continu de l'épaisseur d'hydrocarbures dans les puits d'observation	Institut Carnot ICEEL, 24 k €
Projet de recherche - 2020 Porté par le LSE	BIOSAINE	APR Graine, ADEME
Projet de recherche - 2020 Porté par l'INRAE	Forest Soil	H2020
Aide au montage de projets européens - 2019 Portée par l'unité BEF de l'INRAE	SuccessCode	ANR, 30 k €
Projet de recherche 2020 - 2022 Partenaires : INRAE, IGN, ONF, CNRS, CNES, IRD, Université Paul Sabatier Toulouse	TOSCA SLIM : Space Lidar for Improved Multisource Forest Inventory	CNES, 160 k €
Projet Intra Carnot : Achat de matériel dans le cadre de la thèse d'Emilio Abi Aad	Achat des capteurs de DIMITRI	Institut Carnot ICEEL, 10 k €

ORAGE

Pour ORAGE (Observatoire Régional des Affleurements Géologiques), l'année 2019-2020 a d'abord été marquée par l'embauche sur contrat CDD d'Élise Chenot qui a déployé beaucoup d'énergie pour alimenter le site web. Un travail de mailing a été réalisé pour faire connaître ORAGE aux entreprises susceptibles d'être intéressées par la démarche. Des stagiaires ont été recrutés. Malheureusement le confinement a empêché que leur travail aboutisse complètement et les stagiaires habituels n'ont pu être recrutés, ce qui a limité le développement des contributions originales. Néanmoins, la progression du site est remarquable sur les aspects bibliographiques, sur la géolocalisation des contributions et sur la fréquentation du site. Les compteurs indiquent plus de 350 000 vues depuis le début, ce qui correspond dans les derniers jours à des fréquentations de plus de 1000 vues par jour. Un travail en concertation avec les mines

de Neuves Maisons a été entrepris qui aboutira à terme à la production d'une contribution originale et d'un ouvrage grand public prometteur (un petit échantillon est perceptible à travers l'article du supplément de l'Est Républicain du 1^{er} novembre 2020). Une contribution originale amène aussi à reconsidérer la position stratigraphique de la Pierre de Jaumont, pierre de construction utilisée depuis 2000 ans dans notre région. Un résumé de congrès fait état de la découverte d'une nouvelle espèce de corail bathonienne trouvée en Lorraine.



Une nouvelle espèce de corail du Bathonien de Longuyon trouvée dans le cadre des travaux ORAGE.



Supplément de l'Est Républicain mettant en lumière les travaux de Bernard Lathuilière, dans le cadre du projet Orage, sur le président Albert Lebrun et ses collections géologiques



Le lac de Pierre Percée à un niveau exceptionnellement bas qui a permis le lever d'une coupe géologique.

LA RECHERCHE

Axe 2 : Nouvelles approches pour la transition énergétique

- 2.1 Optimisation de l'utilisation de la biomasse
- 2.2 Ressources fossiles à faible empreinte carbone
- 2.3 Comparaison des apports de la biomasse et des
ressources fossiles
- 2.4 Stockage géologique des déchets radioactifs

Axe 2 : Nouvelles approches pour la transition énergétique

Doctorant	Sujet	Encadrants	Laboratoires	Date de début
Claudia Oliveira	De bois et de houille : le charbon, ressource énergétique au fort impact environnemental dans le passé, enjeux clés pour la transition énergétique.	Vincent Robin, Simon Devin	LIEC	novembre 2018
Toho Hien	Production de biomasse énergétique suivant un gradient d'anthropisation des sols	Serge Garcia Christophe Schwartz	BETA LSE	octobre 2019
Ankit Sagar	Inventaire forestier multisource : un nouvel outil générique et flexible pour répondre aux enjeux territoriaux d'estimation des gisements en bois	Cédric Véga	LIF	janvier 2020
Post-doctorant	Sujet	Encadrants	Laboratoires et partenaires	Date de début
Clémentine Ols	RESFORCLIM : Suivi instantané et tendanciel de l'acquisition des ressources forestières françaises face au changement climatique	Jean-Daniel Bontemps Olivier Bouriaud	LIF IGN	février 2020
Loïc Yung	Compréhension et optimisation des interactions plante - plante - microorganismes dans un système d'agroforesterie pour améliorer le phytomanagement des friches	Damien Blaudez Catherine Sirguy	LIEC LSE	mars 2020
Clémentine Chirol	COSMOS : compromis et optimisation des services écosystémiques rendus par les sols	Geoffroy Séré Delphine Derrien	LSE BEF ANDRA	janvier 2021
Projet exploratoire	Intitulé du projet exploratoire	Référent	Laboratoires et partenaires	Date
	Rapatriement et sauvetage de trois forages de forage du Carbonifère lorrain	Fady Nassif	GeoRessources LFDE	juillet 2020
Stage	Intitulé du stage	Demandeur	Laboratoires	Date
	Modélisation des fonctions de production de biomasse énergétique et des services écosytémiques associés sur différents sols plus ou moins anthropisés	Toho Hien	BETA LSE	janvier 2020
	Évaluation de la qualité des mesures de croissance cumulée de l'inventaire forestier national en vue de leur utilisation en monitoring de la production forestière	Clémentine Ols	LIF Silva	janvier 2020
	Étude de l'effet d'un inoculum fongique sur le développement et l'accumulation de métaux chez <i>Urtica dioïca</i> et <i>Noccaea caerulea</i>	Loïc Yung	LIEC	janvier 2020

Thèse - De bois et d'houille : le charbon comme ressource énergétique au fort impact environnemental dans le passé et enjeux clés pour la transition énergétique

.....
Thèse démarrée en novembre 2018

Encadrement
Vincent Robin LIEC
Simon Devin LIEC
.....

Project abstract

The urgent need to improve and shift to more sustainable and renewable energy sources presents itself as a challenge to comprehend how ancient ways of resources exploitation impacts the environment. Sustainable exploitation of forest and wood resources are considered a renewable source of raw material for energy production that could be employed rather than fossil fuel. Charcoal and wood have been used since immemorial times and they were a valuable source of energy until the Industrial Revolution, and the evidences of their usage are present in different archives. One of those archives are charcoal production platforms or kilns, that can be studied in a multidisciplinary framework in order to assess the impacts of such activity in the past, the persistent traces in the present and their role in the future regarding natural resources exploitation.

Development during the second year

The second year followed the work begun in the first year mainly related to data acquisition and development of image analysis and object detection. The analysis of LiDAR images and the development of an alternative way of charcoal kilns' detection had the first promising results that can provide new perspectives in the study of ancient charcoal production and its impacts

on former land use and forest activities. Having the study area near Bure as a starting point to test the methodology, this approach could be applied in the future to others areas (e.g. northern Vosges) where high-quality LiDAR is already available. A paper is now under preparation and this work is being developed in collaboration of researchers from the DREAM Lab from GeorgiaTech Lorraine, Stéphanie Aravecchia and Cédric Pradalier. LIEC researchers and the DREAM lab have been collaborating in several works regarding image analysis and object detection (e.g. charcoals or diatoms).

Another crucial task of this project is the study of charcoal pieces and their analysis seems to confirm the



Ana Cláudia Fernandes Oliveira

dominance of *Carpinus betulus* in the charcoal assemblage allowing a better understanding of the former use of forest resources. The analysis of charcoal is also an important step in the overall framework providing material for radiocarbon dating. First radiocarbon ages point out to a large diachrony as expected for the period under study. Different dating methodologies are being conjugated to try to distinguish different phases of charcoal production



Axe 2 : Nouvelles approches pour la transition énergétique

by conjugation of the already available radiocarbon dating and Optically-Stimulated Luminescence (OSL) age determination. The application of OSL-dating methodology is being performed in collaboration with Nasrim Karimi Moayed, Dimitri Vanderberghe, Johan de Grave and Koen Deforce from the University of Ghent (Belgium). This collaboration came in the aftermath of the Anthraco 2019 international conference where the methodology was presented applied to the dating of kilns in Belgium and The Netherlands, with promising results.

Data regarding documents and written sources (Xavier Rochel, LOTERR / Université de Lorraine), soil characterization and element composition (Anne Poszwa, LIEC / Université de Lorraine), microstratigraphy (Anne Gebhardt, INRAP), polycyclic aromatic hydrocarbons (Laurence Mansuy-Huault) and the current vegetation survey (Jean-Luc Dupouey, INRAE) will be added to the study in the next phase of the study and data processing in order to achieve the most complete picture of processes of former forest exploitation, vegetation ecology and forest dynamics in strict connection with the project partners.



Charcoal storage

Thèse - 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 démarrée en octobre 2019

Encadrement
Serge Garcia BETA
Christophe Schwartz LSE

Avancées de l'année 2020

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. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé une revue de littérature qui s'ancre dans la bi-disciplinarité. Elle a permis, d'une part, de comprendre la complexité du concept sol en tant que capital naturel support de SE spécifiques, et d'autre part, de mettre en évidence l'importance et la complexité des qualités de sol dans la production des SE et les méthodes qui permettent leur évaluation. Ainsi, le capital naturel rarement explicitement modélisé en économie des ressources naturelles sera le focus de notre modèle avec les différents indicateurs de qualités identifiés (la texture, la matière organique et la minéralogie).

Ensuite, en s'intéressant spécifiquement aux différents SE rendus par les sols, nous avons identifié les principales méthodes permettant de traduire les caractéristiques d'un sol en sa capacité à assurer des fonctions et à rendre des services afin de les

évaluer quantitativement (fonctions de pédotransfert, modèles biophysiques). L'évaluation à la fois physique et monétaire réalisée dans mon travail de thèse va être entreprise dès le début de l'année 2021, notamment par la collecte de données et la mise en route d'un premier stage de recherche.

Dans un troisième temps, nous avons investigué des moyens de fournir une modélisation mathématique des SE rendus par les sols, avec comme données d'entrée les facteurs de production au premier desquels le capital naturel « sol » caractérisé par sa qualité, les activités humaines, le capital physique, l'énergie et le matériel, et d'autres facteurs directs ou indirects.

Résultats

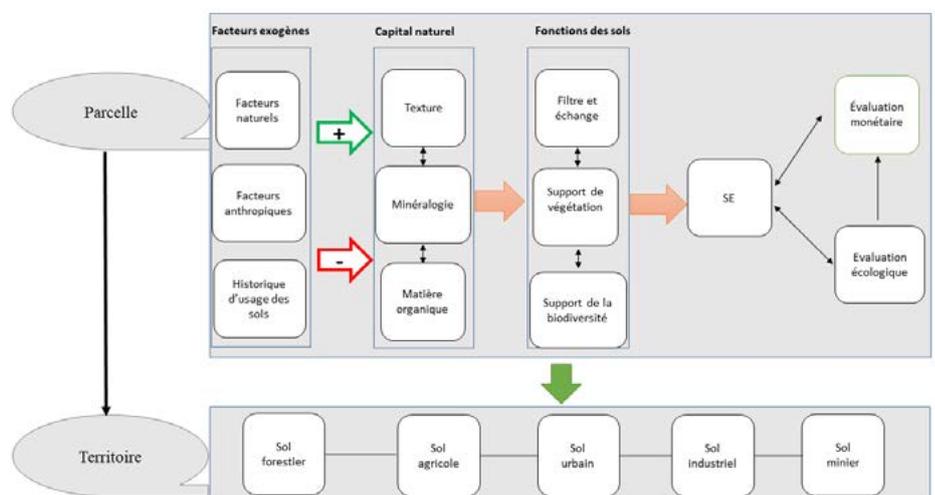
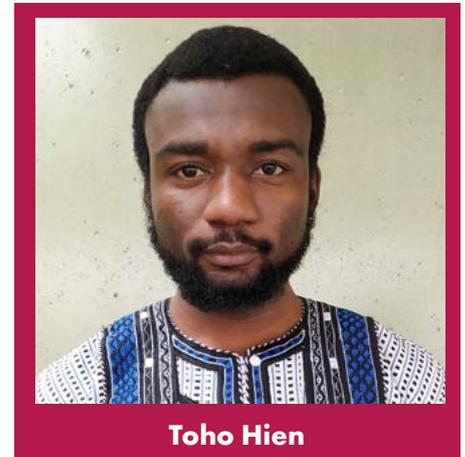


Fig. 1 : Cadre conceptuel de l'évaluation économique des services écosystémiques rendus par les sols



Toho Hien

Il résulte de cette période une revue de littérature importante, mettant en lumière un sujet peu abordé, et qui balaie de nombreuses disciplines. Elle compte une quarantaine de pages et une centaine d'articles issues de revues spécialisées en économie, écologie, pédologie, agronomie ou bien multidisciplinaires. La rédaction de cette synthèse bibliographique est en cours de révision et va faire l'objet d'une soumission dans une revue multidisciplinaire. Parmi les journaux envisagés, c'est *Ecosystem services* vers laquelle va notre préférence.

Par ailleurs, le schéma conceptuel (Fig. 1) issu de notre travail permettra de formaliser le modèle théorique sous la forme de fonctions de production intégrant le capital naturel. Cette étape permettra d'aboutir à une première version d'un article que je souhaite présenter lors de conférences nationales et internationales. Ensuite, nous évaluerons les performances économiques et écologiques de différents types de sols à vocation de production de biomasse énergétique.

Présentations aux séminaires

Au cours du séminaire annuel des doctorants du BETA, j'ai eu l'occasion de faire une présentation de mon sujet de thèse. En dix minutes, j'ai passé en revue le contexte, les objectifs et les étapes de ma thèse. Ensuite, une séance de questions a eu lieu avec les membres du laboratoire. Ce séminaire m'a permis d'avoir les avis et aussi des orientations et pistes de recherche de la part de chercheurs qui ne connaissent pas le sujet mais aussi de la part de ceux qui sont spécialistes en économie de l'environnement et des ressources naturelles.

Autre fait marquant

Ma candidature d'entrée dans l'École Internationale de Recherche d'Agreenium a été retenue. L'EIR-A est un parcours d'excellence pour les doctorants qui permet l'ouverture à l'international et sensibilise à de grands enjeux sociétaux. Il est composé de séminaires annuels organisés par le réseau Agreenium, d'un séjour scientifique à l'international d'au moins trois mois et d'un accompagnement personnalisé dans le parcours EIR-A. C'est un parcours professionnalisant labellisé. En effet, si le doctorant respecte toutes les conditions du parcours, il obtient un label d'excellence pour sa thèse.

Stage - Modélisation des fonctions de production de biomasse énergétique et des services écosystémiques associés sur différents sols

.....
Stage de M2 démarrant en janvier 2021

Encadrement

Toho Hien

Serge Garcia BETA

Christophe Schwartz LSE
.....

Un premier objectif du stage est d'introduire la notion de capital naturel dans les fonctions de production de SE rendus par les sols. Des modèles génériques et/ou spécifiques de fourniture de chaque SE permettront de modéliser et d'estimer des frontières de production et ainsi d'évaluer les performances économiques et écologiques de chaque type de sols en fonction de leurs usages. Cela servira à déterminer les différents SE dont la production peut être optimisée simultanément et ceux dont l'optimisation nécessite une spécialisation des usages des sols. La première étape sera une revue de littérature des fonctions de production des SE introduisant le capital naturel « sol ». Une seconde étape sera de proposer un modèle conceptuel puis fonctionnel de production de SE.

Le second objectif du stage est de collecter les données nécessaires pour une application empirique visant à estimer les frontières de production.

L'évaluation des SE rendus par les sols peut s'effectuer au niveau d'une parcelle de sol ou d'un type d'usage de sols. Il s'agira de collecter des données sur les indicateurs de qualité des sols, sur les rendements de production de biomasses, les types de gestion des sols et les coûts associés si possible. Certaines de ces données pourront être obtenues par enquête, en collaboration avec des organismes partenaires et d'autres seront collectées sur le terrain.

On constate que si des données de caractérisation biophysico-chimique des sols peuvent être obtenues auprès de différentes sources, les données économiques doivent, quant à elles, être collectées sur le terrain par la voie d'enquête. Il faut ainsi s'approcher des gestionnaires pour récolter les données sur les coûts ou utiliser des méthodes d'estimation des coûts révélés.

Sur la base de ces données, des modèles de frontière de production seront utilisés pour mesurer la performance des différentes parcelles et les différents arbitrages entre SE. On pourra utiliser des modèles paramétriques et/ou des modèles non paramétriques comme la Data Envelopment Analysis (DEA) et la Free Disposal Hull (FDH) pour tester la robustesse de nos modèles.

Thèse - 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

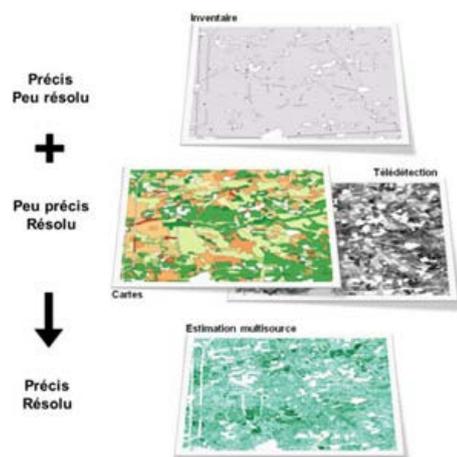
Thèse démarrée en janvier 2020

Encadrement
Cédric Véga LIF

Les méthodes d'Inventaire Forestier Multisource (IMS) ont pour objectif d'améliorer la précision des résultats des inventaires forestiers pour produire des estimations sur de plus petits territoires. Elles reposent sur la combinaison des données ponctuelles issues des inventaires avec des données spatiales, choisies pour leur corrélation avec les attributs forestiers cibles.

Les objectifs de la thèse

L'objectif de cette thèse est de contribuer au développement d'une approche d'IMS adaptée au contexte forestier français et de tester son potentiel pour répondre à des besoins d'information localisées. Cette thèse fait suite à un premier projet de recherche, développé dans un contexte de forêt feuillue de plaine, et vise à adapter la méthode à des contextes topographiques plus complexes et des peuplements plus diversifiés.



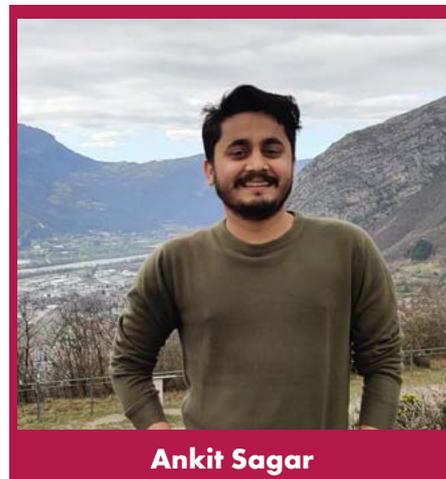
IMS qui combine l'inventaire de terrain, les cartes et la télédetection afin d'obtenir une estimation précise et résolue.

Des méthodes de statistique de sondage seront développées pour modéliser les relations entre attributs de terrain de l'inventaire forestier national et données auxiliaires de différentes natures, notamment la carte forestière, des images satellites, des modèles 3D de canopée lidar, des cartes prédictives des propriétés biophysiques des sols.

Différentes approches d'inférence statistique (assistée d'un modèle, basée sur un modèle et hybride) seront évaluées, pour des attributs forestiers renseignant sur les stocks de bois ventilés par classes de diamètre, mais aussi sur les flux comme la production en volume. Les estimations de flux seront analysées, plus particulièrement les infestations de scolyte dans le département des Vosges.

Bilan de la première année

La paralysie des déplacements professionnels, liée au contexte sanitaire, a généré des retards de livraison des données nécessaires au démarrage de la thèse, en particulier les données Lidar. L'analyse de ces données, acquises en hiver, a par ailleurs révélé un problème d'échantillonnage des couverts forestiers feuillus. Une solution au problème pourrait être de travailler à partir de modèles 3D issus de la corrélation d'images aériennes ou de se concentrer sur le nord des Vosges où un vol lidar a été réalisé durant l'hiver 2019-2020.



Ankit Sagar

Dans l'attente, les travaux de recherche ont été recentrés sur un site déjà documenté du point de vue des données (en Sologne). Une modélisation par une approche non paramétrique de type k plus proches voisins (knn) a été combinée à une méthode de ré-échantillonnage afin de démontrer la capacité de ces approches à produire des cartographies à très haute résolution spatiale avec production des incertitudes associées. Plusieurs jeux de données de calibration/validation ont été générés afin d'analyser la transférabilité des modèles. Ils ont été construits de façon à maximiser la variabilité des structures forestières, en intégrant de l'information sur la propriété forestière et les régions écologiques. Ces jeux de données permettront de tester la capacité prédictive des approches knn sur la ventilation des résultats, les analyses étant conduites pour différentes formes de ventilation du volume (total, conifères/feuillus et classes de diamètres).

Les traitements sont actuellement en cours. Une publication est prévue pour le premier semestre 2021.

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

Post-doc démarré en février 2020
En co-financement avec l'IGN et le Labex ARBRE

Encadrement
Jean-Daniel Bontemps LIF - IGN
Olivier Bouriaud LIF - IGN

Bonjour Clémentine. Cette année, tu as eu l'occasion d'être interviewée dans le cadre d'un reportage du journal Le Monde « Les forêts européennes à l'épreuve de la sécheresse ». Peux-tu nous en dire plus ?

Au début, je n'y croyais pas vraiment. Être contactée par *Le Monde*, ça n'arrive pas tous les jours. Quand j'ai vu le titre du mail "Journaliste Le Monde/sécheresse de forêts", je me suis dit que c'était un énième spam. Mais non ! J'ai rencontré la journaliste Perrine Mouterde dans un café parisien pour échanger sur nos résultats récents concernant l'influence du changement climatique sur les forêts françaises, publiés dans *Science of the Total Environment* en juillet 2020.

Ce reportage du Monde fait état de l'impact de la sécheresse sur les forêts et des possibilités d'adaptation forestière face à de telles contraintes climatiques, en s'appuyant sur les témoignages et analyses de plusieurs spécialistes de la forêt (INRAE, ONG, DSF, IGN). Ma participation a d'abord souligné le fait qu'en six ans, la moitié des peuplements étudiés ont vu leur précipitation estivale diminuer de plus de 25 % puis, qu'au vu des résultats de notre étude, les plantations de conifères à la structure hétérogène (importance variabilité des diamètres des arbres) semblent plus résilients aux changements climatiques que les plantations homogènes.

Perrine Mouterde a fait un excellent travail de vulgarisation pour un sujet aussi complexe. Je ne peux donc que vous conseiller la lecture de ce reportage.



Clémentine Ols

Peux-tu revenir plus en détail sur cet article publié dans *Science of the Total Environment* ?

Cette étude, publiée en juillet 2020, a permis d'évaluer, grâce aux données de l'Inventaire Forestier National, les effets récents du changement climatique sur les forêts de conifères en France.

En s'appuyant sur > 10 000 mesures d'accroissement radial, nous avons évalué les anomalies annuelles de croissance de huit espèces de conifères majeures dans le secteur forestier français et européen sur la période 2006-2016. La croissance radiale de ces espèces a été modélisée dans des peuplements purs et réguliers, c'est-à-dire des peuplements avec une seule essence présente et des arbres aux dimensions à peu près similaires, pour limiter les effets de la composition et de la structure du peuplement sur la croissance. Ce type de peuplements est aussi celui majoritairement utilisé en sylviculture des conifères en France de nos jours. Chaque espèce a été modélisée dans autant de contextes bioclimatiques que possible. En tout, 16 systèmes forestiers ont pu être étudiés (Fig. 1A).

Le Monde
MÉTROPOLES 9 SEPTEMBRE 2020

Les forêts françaises à l'épreuve de la sécheresse

Arbres dépérissants, attaques de ravageurs : les massifs souffrent du manque d'eau et des canicules répétées

REPORTAGE

COMMUNIQUÉ (DRI) - PHOTOGRAPHIE

Ici, ce sont des troubles dans la canopée. Les arbres, poussant dans la zone de l'épicéa, ont perdu leurs feuilles les plus hautes, laissant passer la lumière. Là, c'est un moment d'écorce qui se décolle tel un sparadrap usé. Un peu plus loin encore, c'est un hêtre au houppier dégarni et aux feuilles plus petites qu'à la normale. A ses pieds, des jeunes arbres dépérissent déjà.

Il y a une dizaine d'années, ce secteur de la forêt de Compiègne (Oise), l'une des plus riches du pays, était encore en parfaite santé. Certains arbres avaient été coupés pour favoriser le développement des semis naturels. « Cette parcelle devait être régénérée mais, aujourd'hui, nous ne sommes pas sûrs que ça marche », constate Bertrand Wimmers, le directeur de l'agence de Picardie de l'Office national des forêts (ONF).

Avec ses sols sableux qui ne retiennent pas l'eau, cette forêt, qui fut le terrain de chasse des rois de France, est particulièrement affectée par les sécheresses. Mais la plupart des territoires sont touchés, à des degrés divers. A Brive,

« On a le sentiment que ce qu'on imaginait comme scénario pour 2040 ou 2050 est en train de se produire aujourd'hui »

BERTRAND WIMMERS de l'agence de Picardie de l'Office national des forêts

effets cumulatifs sont complexes mais on peut penser qu'un arbre aggrave par une sécheresse aussi plus de mal à se remettre d'un nouvel épisode extrême », abonde Sylvain Delzon, biologiste-écologue à l'Institut national de recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (Inrae). En période de sécheresse, l'arbre ferme ses pores – appelés stomates – pour limiter ses pertes d'eau. Comme chez les hommes, la transpiration permet de réguler la température des organes. L'arrêt de celle-ci peut conduire, à un certain point, à un échauffement des



Axe 2 : Nouvelles approches pour la transition énergétique

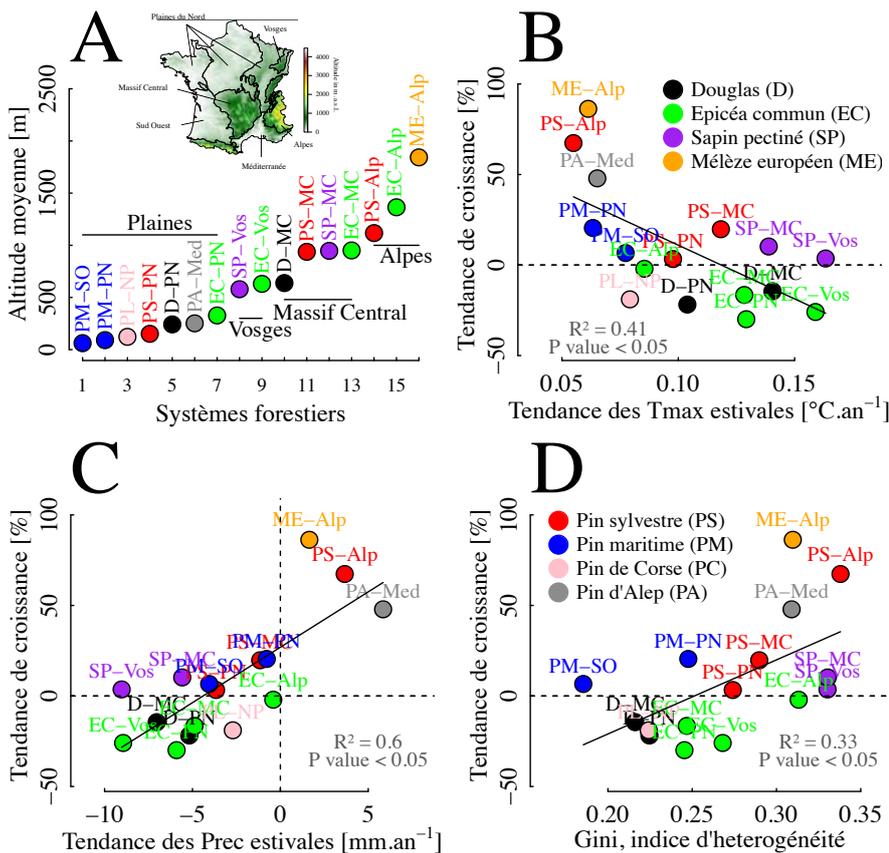


Fig. 1 : Résumé graphique des résultats publiés dans Ols et al. 2020

Les données de croissance ont d'abord été filtrées de tous les effets non-climatiques, comme l'effet de la taille de l'arbre, de la structure du peuplement et du type de sol, par modélisation afin d'isoler les anomalies de croissance liées au climat uniquement. Les tendances décrites par ces anomalies de croissance ont ensuite été comparées à des variables environnementales, comme les changements climatiques saisonniers en température et précipitation sur la période d'étude.

Nous avons ainsi observé que les tendances de croissance sur la période 2006-2016 sont très fortement liées à la vitesse de réchauffement auquel un système forestier fait face, et ce quel que soit son climat moyen initial. Ainsi, les peuplements situés dans les régions qui se réchauffent le plus vite (surtout en hiver et en été) ont vu leur croissance diminuer alors que les peuplements des régions au réchauffement plus modéré

ont vu leur croissance augmenter (Fig. 1B).

D'autre part, les tendances de croissance semblent être étroitement liées aux contraintes hydriques des systèmes forestiers. Ainsi, les tendances de croissance négatives ont principalement été observées dans les régions où les précipitations estivales et la capacité de rétention en eau du sol sont élevées mais où ces dernières ont diminué au cours de 2006-2016 (Fig. 1C).

Nous avons également mis en évidence que les peuplements les plus hétérogènes en diamètres présentaient les tendances les plus positives (Fig. 1D). L'hétérogénéité de la structure d'un peuplement apparaît donc favoriser sa croissance en contexte d'augmentation des contraintes hydriques et thermales.

L'ensemble de ces résultats constitue une piste intéressante pour développer

une gestion forestière augmentant la résilience des peuplements de conifères face aux variations climatiques à venir.

L'efficacité des méthodes développées et l'importance de l'information produite de cette étude démontrent la possibilité de déployer un système de monitoring national des forêts basé sur l'Inventaire Forestier National.

La publication :

Ols, C., Hervé, J.-C., Bontemps, J.-D., 2020. Recent growth trends of conifers across Western Europe are controlled by thermal and water constraints and favored by forest heterogeneity. *Science of The Total Environment* 742, 140453. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140453>

As-tu des résultats supplémentaires à nous faire part en ce qui concerne l'année 2020 ?

L'année 2020 a été intense :

- D'abord en termes de valorisation scientifique, avec évidemment un premier article publié (Ols et al. 2020), un deuxième accepté avec corrections et un troisième soumis il y a peu pour publication. Il y aura donc de nouvelles contributions scientifiques DEEPSURF au printemps 2021 !
- Ensuite, en terme d'analyses, avec la création d'un package R visant à améliorer l'ergonomie et la vitesse des analyses (ensemble de fonctions de calcul prédéfinies), et à faciliter le transfert opérationnel des résultats dans la production régalienne de l'IGN pour ainsi déployer un système de suivi temporel inter-régional de la productivité des peuplements forestiers. Le premier point chronophage mais crucial a consisté à automatiser ma

Axe 2 : Nouvelles approches pour la transition énergétique

méthodologie de modélisation pour faciliter et optimiser l'étude des anomalies de croissance à toute espèce forestière et toute région sylvicole année après année. Cette automatisation a notamment permis de sortir les premières chronologies de productivité pour les principales espèces feuillues françaises (chênes, hêtre, châtaignier et frêne) (Fig. 2). J'espère pouvoir vous les présenter lors du prochain séminaire.

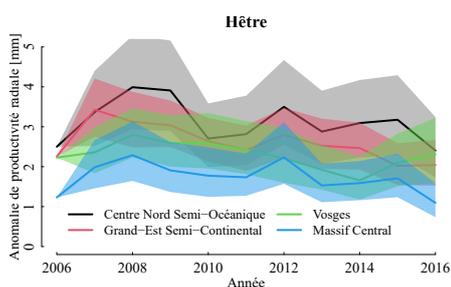


Fig. 2 : Anomalies annuelles de productivité du hêtre en futaie régulière entre 2006 et 2016 dans quatre régions métropolitaines et enveloppes de confiance à 95% associées.

Qu'envisages-tu pour l'année 2021 ?

Mes bonnes résolutions scientifiques pour 2021 sont de :

- Finaliser l'automatisation de la construction des modèles et intégrer progressivement, au fil des analyses, d'autres fonctionnalités au package (ex. production de cartes d'anomalies, analyse climat-croissance).
- Mettre en place une méthodologie d'interpolation des anomalies régionales de productivité à l'échelle locale (1 km x 1 km) pour produire des cartes d'anomalies de productivité annuelles, informer les acteurs de la forêt et orienter les politiques forestières territoriales et nationales en France (Fig. 3).
- Élargir les systèmes forestiers étudiés aux structures hétérogènes. Jusqu'à présent mes analyses se

limitaient aux forêts régulières (arbres de même hauteur). Comme certaines essences ne sont que partiellement retrouvées dans de telles structures, il est envisagé d'inclure des forêts aux structures plus disparates dans les analyses (ex. futaie irrégulière, taillis sous futaie).

- Identifier les origines climatiques des anomalies de production forestière. Je compte isoler les principales variables climatiques mensuelles à l'origine des patrons d'anomalies de productivité de systèmes forestiers et extraire les fonctions de réponses climat-productivité associés. Ces fonctions de réponses permettront, en utilisant les scénarios de climat futur, d'étudier les évolutions potentielles de productivité de l'ensemble des systèmes forestiers étudiés.

Pour aller plus loin, un dossier dans le journal La Croix : <https://www.la-croix.com/Sciences-et-ethique/foret-francaise-face-rechauffement-climatique-2021-01-25-1201136907> et une publication dans *Environmental Research Letters* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd6a7>

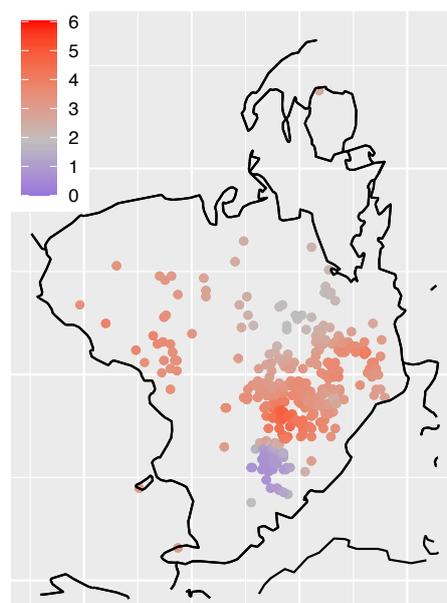


Fig. 3 : Anomalies de productivité radiale du pin sylvestre dans le Massif Central en 2015 en millimètres



Stage - Évaluation de la qualité des mesures de croissance cumulée de l'inventaire forestier national en vue de leur utilisation en monitoring de la production forestière

.....
Stage de M2 démarrant en janvier 2021

Encadrement
Clémentine Ols LIF - IGN
Olivier Bouriaud LIF - IGN
.....

Contexte

Mes travaux post-doctoraux de modélisation des dynamiques de croissance forestières se basent sur l'utilisation des mesures annuelles d'accroissement radial de l'inventaire forestier national. Ces mesures ne sont disponibles que depuis 2007. Afin d'étendre la période d'étude (extraction de tendances de croissance sur le plus long terme) et la profondeur d'échantillonnage (augmentation de la puissance statistiques des modèles), une autre donnée de croissance existe. Depuis 2005, l'accroissement radial cumulé des cinq dernières années (IR5) est mesuré chaque année sur le terrain par les agents de l'inventaire grâce au prélèvement de carottes de croissance. Cette mesure est réalisée sur > 5000 points de sondage, correspondant à > 30000 arbres / an, ce qui constitue une base de données exceptionnelle du suivi de la croissance des forêts en France. Néanmoins, ces données présentent de possibles erreurs de mesure (ex. cerne manquant, faux-cerne). En 2011 et 2012, les carottes de croissance mesurées par les agents ont été collectées et mesurées en laboratoire avec des méthodes permettant une précision de mesure beaucoup plus grande que les mesures de terrain. Le lot de 2011 a fait l'objet d'une première qualification (Mériani & Hervé 2014) qui a identifié des erreurs de mesures plus fréquentes pour les essences

feuillues que pour les conifères. Dans un contexte où mes efforts de modélisation se portent sur les feuillus, il devient important de traiter le lot de 2012 et de terminer la qualification de cette donnée avant son intégration aux analyses. La qualification de ce 2^{ème} lot fait donc l'objet du stage proposé.

Objectif

L'objectif de ce stage est d'évaluer la précision des mesures de terrain, de détecter, modéliser et corriger les possibles erreurs et biais dans les mesures. Les travaux proposés sont variés et font intervenir des méthodes tenant de plusieurs disciplines : la dendrochronologie (séries temporelles de croissance radiale des arbres), les statistiques : régressions et analyse de variance.

Les travaux consistent dans : (i) la datation des cernes, construisant des courbes de référence permettant d'attribuer à chaque cerne une année (saison de végétation) durant laquelle il a été produit, (ii) la correction du biais de rétrécissement des carottes entre les mesures terrain et laboratoire (régressions pour chaque essence), (iii) détection des cernes manquants ou mal identifiés, (iv) analyses statistiques des erreurs et biais entre les mesures terrain et laboratoire.

Perspectives

Ce stage permettra à l'étudiant.e de découvrir le milieu de la recherche française, d'acquérir une rigueur méthodologique scientifique et des connaissances en termes d'inventaire forestier, et de contribuer au processus de qualification d'une donnée régalienne nationale qui, une fois qualifiée, sera accessible à la communauté scientifique locale et nationale sur le site de l'inventaire forestier national. Les résultats de ce stage sont également pressentis pour une valorisation rapide dans une revue scientifique. Les données nécessaires au déroulement du projet sont toutes disponibles et archivées et peuvent être transférées sans difficulté (la taille totale est d'environ 2GB). Ce stage pourrait donc être réalisé en télétravail en grande partie, si la situation sanitaire venait à se détériorer.

Post-doc - COSMOS : Compromis et optimisation des services écosystémiques rendus par les sols

Post-doc démarrant en janvier 2021
Co-financement ANDRA

Encadrement
Geoffroy Séré LSE
Delphine Derrien BEF



Clémentine Chirol

« Originaire d'Île-de-France, j'ai suivi un Master en géosciences, puis un doctorat à l'université de Southampton sur la restauration des marais littoraux dans des zones où les sols ont été modifiés par l'activité agricole. J'ai ensuite fait un postdoc à l'Université Queen Mary à Londres sur la microstructure 3D des sols littoraux, et développé de nouveaux outils d'interprétation de données de tomographie (CT-scan) pour évaluer l'effet des racines et de la porosité sur la résistance des sols à l'érosion. »

Je m'intéresse à la restauration d'écosystèmes pour promouvoir non seulement la biodiversité, mais aussi certaines fonctions cruciales comme le piégeage du carbone et la résistance à l'érosion. Cet intérêt m'a amené à me tourner vers la notion de services écosystémiques et de gestion du territoire.

Dans le cadre de la caractérisation environnementale du site pressenti d'implantation de Cigéo, l'ANDRA a mis en place l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) dont la vocation est d'observer les évolutions d'un territoire rural autour du futur centre de stockage, avant et pendant les phases de construction et d'exploitation.

Dans le contexte global de la transition énergétique et celui, spécifique à la zone d'étude, d'implantation d'un projet industriel, les pratiques humaines en matière de gestion des sols sur ce territoire sont vouées à évoluer. Il convient alors de chercher à optimiser certains services écosystémiques (SE) cibles au regard des enjeux - en particulier la production de biomasse énergie et la régulation du climat, via le stockage de carbone (C) - sans négliger les autres SE (par exemple l'habitat pour la biodiversité, mais aussi le confinement de déchets incluant la régulation de la dissémination de polluants). D'un point de vue

opérationnel, pour le développement du territoire et pour l'environnement, des méthodes d'aide à la décision pour l'optimisation des SE rendus par les sols sont attendues.

En aménagement du territoire, les compromis en termes de SE peuvent être définis comme « les choix d'aménagement ou de gestion qui augmentent la production d'un (ou plusieurs) SE, au détriment des autres ». Il a été montré que, si plusieurs modes de production de biomasse à vocation énergétique affectaient négativement le stockage de C (ainsi que des services liés à la biodiversité et à la valeur esthétique), d'autres permettaient au contraire une synergie. De plus, une étude dédiée à l'implantation de biomasse à vocation énergétique a démontré que la nature des sols avait un impact significatif sur l'intensité de ces compromis entre SE. Enfin, une équipe a récemment suggéré que, par le biais de modèles simples reposant sur l'évaluation (à partir de bases

documentaires) et la cartographie des SE, il était possible de maîtriser les compromis et d'orienter les choix d'aménagement.

Objectifs scientifiques

1. Sur un territoire à enjeu (OPE), présentant un gradient d'anthropisation des sols (depuis des sols forestiers, jusqu'à des sols artificialisés), conduire une évaluation des bouquets de SE rendus en utilisant une méthode semi-quantitative basée sur les données « sol »
2. Fournir les bases d'un outil d'aide à la décision permettant de définir des scénarios de transition, en termes d'aménagement, pour optimiser des SE d'approvisionnement en biomasse énergie et de régulation du climat global, sans négliger les autres SE (recherche de compromis).

Post-doc - 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-doc démarré en mars 2020
Co-financement projet européen NETFIB

Encadrement
Damien Blaudez LIEC
Catherine Sirguy LSE



Loïc Yung

Depuis toujours intrigué par les différentes composantes des écosystèmes et leur fonctionnement, je me suis dirigé vers une licence de biologie. J'ai pu rapidement prendre conscience que les problématiques environnementales actuelles étaient à l'origine d'enjeux majeurs de gestion et de réhabilitation des écosystèmes. C'est dans le cadre du Master Gestion Durable de l'Environnement, réalisé à l'Université de Bourgogne Franche-Comté que j'ai pu découvrir le domaine des sites et sols pollués. Au travers plusieurs expériences professionnelles en tant qu'ingénieur, j'ai pu m'immerger dans le monde de la recherche et me spécialiser dans les techniques de phytoremédiation. Dans une volonté de tester de nouvelles approches agroécologiques, j'ai décidé d'entreprendre une thèse de doctorat au sein du laboratoire Chrono-environnement UMR 6249 (Université de Bourgogne Franche-Comté, Montbéliard) sur le fonctionnement et les performances de l'agrosystème peuplier-ortie pour le phytomanagement de sites pollués par les éléments traces métalliques.

Le projet PPMI a pour objectif général de caractériser la diversité fongique associée à des plantes phytoremédiantes et à mieux comprendre l'effet de certains champignons endophytes sur des co-cultures végétales dans un contexte de phytomanagement de sites marginaux. Pour cela, nous visons à tester deux scénarios opposés de co-cultures plantes-plantes inoculées par des consortiums fongiques : i) optimisation de la croissance de l'ortie (*Urtica dioïca*) et de la production de fibres non contaminées dans un système agroforestier peuplier-ortie et ii) amélioration de la phytoextraction des éléments traces (ET) par l'hyperaccumulateur *Noccaea caerulescens* associé à des Salicacées. Le projet s'organise autour des trois tâches suivantes :

Tâche 1 : Caractériser la diversité fongique associée aux racines de l'ortie et de *N. caerulescens*

Les activités liées à cette tâche ont essentiellement reposé sur des prélèvements de matériel biologique et de sols effectués sur une large zone géographique sur près de 25 sites contrastés (peu anthropisés, marginaux, cultivés). Ces échantillons ont permis d'isoler environ 300 souches d'endophytes fongiques (diversité cultivable). Ces dernières ont été caractérisées taxonomiquement et fonctionnellement (tests in vitro du potentiel de promotion de croissance des plantes). Les souches les plus prometteuses seront sélectionnées pour les inoculations de plantes prévues dans la tâche 2.

Le protocole expérimental de metabarcoding environnemental visant

à étudier la diversité fongique totale associée aux racines de ces deux plantes est actuellement en phase d'optimisation. Il s'agit ici de favoriser l'obtention d'extraits d'ADN de qualité, représentant la plus grande diversité fongique possible, tout en minimisant les artéfacts d'amplification d'ADN végétal.

Tâche 2 : Étudier les effets d'endophytes fongiques sur le développement et les capacités phytoremédiantes des plantes au travers d'expériences en mésocosme.

Des jeux de données préliminaires (obtenus lors du projet EndoExtract, OTELo 2017-2018), portant sur l'effet d'endophytes fongiques sur le potentiel de phytoextraction de *N. caerulescens* ont été analysés et valorisés, donnant lieu à un article scientifique intitulé



Stage - Étude de l'effet d'un inoculum fongique sur le développement et l'accumulation de métaux chez *Urtica dioica* et *Noccaea caerulescens*

Stage de M2 démarrant en janvier 2021

Encadrement
Loïc Yung LIEC _ LSE

« Dark septate endophytes isolated from non-hyperaccumulator plants can increase phytoextraction of Cd and Zn by the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens* », publié dans le journal *Environmental Science and Pollution Research*. Un second article en lien avec ce volet est actuellement en préparation.

Deux nouvelles expériences en mésocosme débuteront prochainement, portant sur des essais d'inoculation de l'ortie et sur l'intérêt d'une co-culture *N. caerulescens* - ligneux. Les designs expérimentaux en lien avec les hypothèses de recherche ainsi que les paramètres à étudier ont été définis et validés suite à une phase de pré-tests. Ces activités se poursuivront en 2021 dans le cadre du stage d'un étudiant de master 2, dont le recrutement a été rendu possible grâce au soutien financier (gratification) de DEEPSURF.

Tâche 3 : Étudier in situ l'effet d'associations plante-plante-microorganismes sur les propriétés biotiques et abiotiques du sol

Le projet PPMI prévoit également la mise en place de dispositifs associant, in-situ, des ligneux à *N. caerulescens* ou à *U. dioica*. Les conditions expérimentales ainsi que les paramètres qui seront étudiés ont été définis. Des collaborations avec des gestionnaires de sites ont été amorcées et les plantations seront mises en place au printemps prochain, sous réserve de faisabilité opérationnelle en lien avec la crise sanitaire actuelle.

Contexte

Les objectifs de mon post-doctorat consistent à :

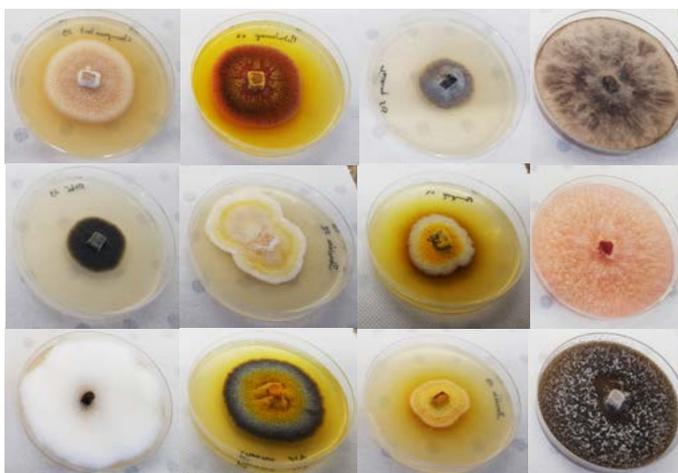
- Caractériser la diversité taxonomiquement et fonctionnelle des microorganismes fongiques associés à des co-cultures peuplier-ortie et peuplier-*Noccaea caerulescens*
- Tester en mésocosmes et in-situ l'effet de DSE sur le développement et les propriétés phytoremédiantes de ces plantes.

Les différentes tâches permettant de répondre à ces objectifs reposent sur des prélèvements biologiques qui s'effectuent pendant la période de végétation. En raison des dispositions liées au Covid-19, certains prélèvements ont été contraints d'être repoussés d'une année. Par conséquent, un appui me sera indispensable afin de mener à

bien, dans un délai réduit, l'ensemble des tâches initialement prévues.

Sujet de stage

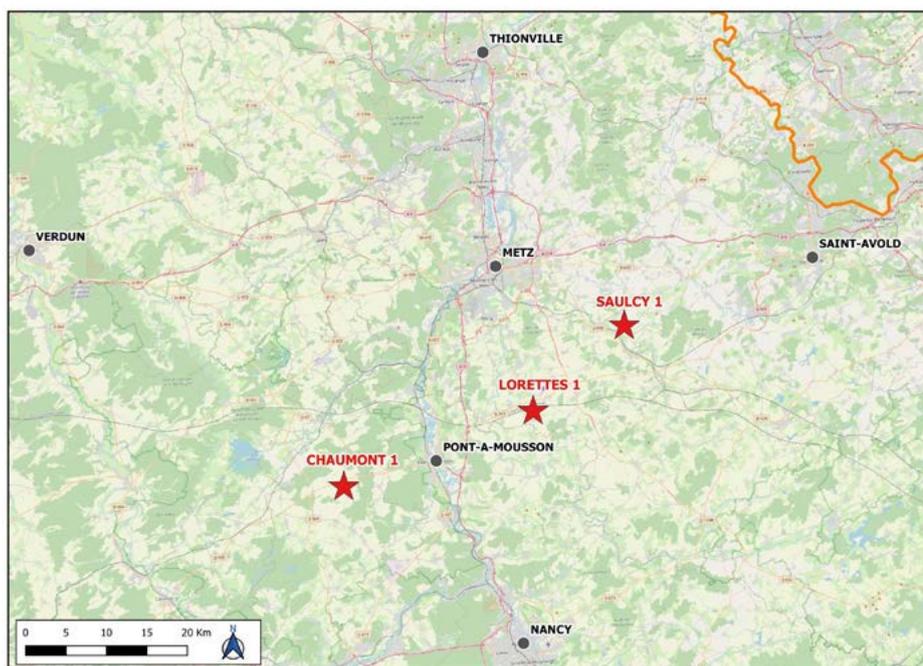
Le sujet de stage proposé s'intitule « Étude de l'effet d'un inoculum fongique sur le développement et l'accumulation de métaux chez *Urtica dioica* et *Noccaea caerulescens* » et s'inscrit dans la continuité des travaux que je mène actuellement. L'objectif général sera d'évaluer l'intérêt des DSE pour augmenter les capacités phytoremédiantes de ces plantes sur des sols enrichis en ETM. Pour répondre à cet objectif, le candidat sera chargé de mettre en œuvre, assurer le suivi, réaliser des analyses écophysiologicals et microbiologiques et enfin exploiter les données issues d'un test en mésocosme. Ce dernier consistera à cultiver ces plantes sur des sols enrichis en ETM et inoculés avec des souches de DSE présélectionnées.



Projet exploratoire - Rapatriement et sauvetage de trois carottes du Carbonifère lorrain

Projet exploratoire juillet-août 2020
Co-financement La Française de l'Énergie

Référent
Fady Nassif La Française de l'Énergie



Carte topographique localisant les 3 forages carottés

La Française de l'Énergie, implantée en Lorraine depuis 2006, est spécialisée dans l'évaluation et le développement des ressources gazières contenues dans les anciens bassins miniers du Grand Est et des Hauts-de-France.

Afin d'évaluer le potentiel du bassin lorrain, la société a réalisé plusieurs forages de recherche dans le périmètre des titres miniers qu'elle détient. Ces forages, avec l'intégration de toutes les données sismiques et d'affleurements ont permis aux scientifiques de reconstruire une image 3D du sous-sol et d'évaluer les ressources de gaz présentes dans le sous-sol. La partie la plus importante et la plus fiable de ces données est constituée sous forme de carottes. Des

échantillons de roches cylindriques sont prélevés dans des zones à intérêt à l'aide de carottiers. Ces échantillons et leurs analyses sont l'image directe des couches géologiques. Ils permettent de visualiser et d'apprécier l'agencement des couches géologiques afin de retracer l'histoire géologique locale et régionale (tectonique, environnement de dépôts, etc.) à partir de la stratigraphie.

En effet, en l'absence de données sismiques 3D détaillées et de diagraphies complètes

dans les puits forés, ces données sont primordiales pour la compréhension du bassin et de ses enjeux. Ces carottes représentent donc une valeur technique et scientifique inestimable et font partie du patrimoine géologique de la région.

La Française de l'Énergie, engagée dans une démarche de préservation du patrimoine géologique du bassin lorrain, dispose actuellement de plusieurs centaines de mètres linéaires de carottes, prélevés sur cinq puits forés en Moselle, stockés et répertoriés. La société a construit une carothèque dédiée sur la commune de Pontpierre afin de stocker et classer les carottes existantes et pouvoir les étudier (paillasse de travail, espace de bureau environnés).

Ainsi, la société a rapatrié les carottes de trois puits historiques entreposés sur le site de Storengy de Mareuil-sur-Ourcq, dans l'Oise, forés dans la région par un ancien opérateur



Aperçu des boîtes contenant les carottes. Elles ont été disposées dans 6 containers métalliques depuis 1995

Axe 2 : Nouvelles approches pour la transition énergétique



Transvasement d'une carotte de sa boîte endommagée vers une boîte en bon état

dans les années 1990. Ces carottes, représentant plus de 2500 mètres de couche sédimentaire, présentent un intérêt géologique et patrimonial très important puisqu'elles sont le fruit d'une campagne exploratoire et sont les seules à atteindre des couches géologiques profondes (Westphalien B) dans le bassin lorrain.

Ces carottes, propriété de l'État français, auraient dû être détruites par défaut d'alternative. La Française de l'Énergie s'est donc engagée à récupérer ces carottes et les intégrer dans sa collection afin de consolider le patrimoine du sous-sol lorrain.

Dans ce cadre, un projet de collaboration avec DEEPSURF et le laboratoire GeoRessources a été mis en place pour le rapatriement des carottes des puits de Saulcy-1, Lorettes-1 et Chaumont-1 en Lorraine. Le projet s'est concrétisé sous forme d'un stage d'été durant la période de juillet-août 2020. Sept étudiants en première et deuxième

année à l'ENSG (École nationale supérieure de géologie) ont été sélectionnés pour le stage qui s'est déroulé en deux étapes : une semaine à Faulquemont et trois semaines à Mareuil-sur-Ourcq.

Durant ce stage, les étudiants ont été initiés à la description des carottes et à la levée de log stratigraphiques. Ils ont pu redécouvrir la géologie du bassin lorrain à travers les échantillons prélevés des puits et décrire les structures sédimentaires et stratigraphiques à l'échelle de la carotte, tout en développant leurs compétences organisationnelles. Les étudiants ont pu également mettre en relation leurs observations avec les données diagraphiques et les études réalisées par l'ancien opérateur. Malgré les restrictions liées au contexte sanitaire, les étudiants ont pu se familiariser à travailler dans un contexte opérationnel exigeant et les objectifs fixés initialement ont été atteints.

Le reconditionnement des carottes par les étudiants a permis leur description ainsi que leur transport dans la nouvelle cartothèque de LFDE.

Finalement, ces échantillons seront mis à disposition des étudiants et des chercheurs de l'Université de Lorraine et serviront à alimenter plusieurs travaux de recherche dans le cadre des projets DEEPSURF et Regalor. Ils pourront également servir pour alimenter une base de données avec un référencement national.

LE PROJET EN CHIFFRES :

7 étudiants-stagiaires mobilisés pour le projet

1 mois de travail sur place (du 15 juillet au 21 août)

2500 mètres linéaires de carottes rapatriées soit l'équivalent de 70 tonnes

Collaboration entre les projets DEEPSURF, Regalor et la société LFDE

40% du budget financé par DEEPSURF (12 K €), **60 %** financé par LFDE (18 K €)



Stagiaires et encadrants devant les palettes de carottes classées dans l'ordre et par puits

LA RECHERCHE

Axe 3 : Interactions profond - surface

3.1 Nouveaux outils de mesure et surveillance, appliqués à différents compartiments (correspondant à des sous-tâches) :

3.1.1 sous-sol - aquifère - sol (- 1 200 à 0 mètres)

3.1.2 surface - végétation (0 - 35 mètres)

3.1.3 atmosphère (35 - 2000 mètres)

3.2 Acquisition et gestion de bases de données, modélisation et approches mathématiques, également découpé en sous-tâches :

3.2.1 plan de gestion des données de la collecte au stockage

3.2.2 les bases de données biogéochimiques

3.2.3 approches mathématiques des phénomènes de transfert

Axe 3 : Interactions profond - surface

Doctorant	Sujet	Encadrants	Laboratoires	Date de début
Didi Adisaputro	Météorologie, monitoring et modélisation des processus de transfert des gaz CO ₂ et CH ₄ au sein du système géosphère/biosphère (-20, 10 m)	Philippe de Donato Laurent Saint-André	GeoRessources BEF	décembre 2017
Nicolas Bras	Consommation de méthane (CH ₄) par les sols forestiers : variabilité spatiale des processus physiques et biotiques impliqués en vue d'estimer le puits des forêts du Grand Est	Daniel Epron Caroline Plain	Silva	mars 2018
Mohammad Iktiham Bin Taher	Nouveaux capteurs de type HEMT pour l'analyse biogéochimique in-situ	Jacques Pironon Simon Gauthier	GeoRessources Institut Lafayette	octobre 2019
Christophe Reype	Estimation simultanée des paramètres et détection de structures dans les données spatialisées	Radu Stoica Madalina Deaconu Antonin Richard	IECL GeoRessources	octobre 2019
Laurie Tchang-Tchong	Les hydrocarbures comme marqueurs des transferts entre réservoirs profonds et zone critique. Le cas du bassin de Pechelbronn	Raymond Michels Pierre Faure-Catteloin	GeoRessources LIEC	octobre 2019
Jeanne Touche	Effet de la sécheresse sur le fonctionnement biogéochimique d'un écosystème forestier. Interactions entre les flux d'eau, d'éléments et de gaz dans la colonne atmosphère - végétation - sol - régolithe	Marie-Pierre Turpault Philippe de Donato	BEF GeoRessources	octobre 2019
Carolina Dantas Cardoso	Traçage isotopique continu du transfert des fluides crustaux vers la surface, en relation avec les aléas naturels (sismiques /volcaniques) ou anthropiques	Raphaël Pik	CRPG	octobre 2019
Emilio Adi Aad	Modélisation physique et numérique de la stabilité des ouvrages souterrains	Olivier Deck Marianne Conin	GeoRessources	février 2020
Post-doctorant	Sujet	Encadrants	Laboratoires et partenaires	Date de début
Amélie Cavelan	Impact des variations du niveau des nappes phréatiques liées au changement climatique sur la remobilisation des polluants organiques	Pierre Faure Fabrice Golfier	LIEC GeoRessources BRGM	avril 2020
Hien Nguyen	Comportement hydro-mécanique des failles dans le contexte du stockage géologique du CO ₂	Luc Scholtès	GeoRessources	mai 2020
Rouba Alramouz	Nouvelle technologie microélectronique de capteurs pour la détection d'un flux d'Hélium	Mathieu Lazerges Simon Gauthier	GeoRessources Institut Lafayette 45_8 Energy	septembre 2020
Romain Hemelsdael	Modélisation structurale 3D et d'évolution thermique du bassin Carbonifère-permien sarro-lorrain	Raymond Michels Laurent Beccaletto	GeoRessources BRGM	janvier 2021
Projet exploratoire	Intitulé du projet exploratoire	Référent	Laboratoires et partenaires	Date
	Geochemical identity (gID) of raw materials and refined metals for enhancing traceability in the global supply chains: a case study of copper	Xuan Liu	GeoRessources	septembre 2020

Axe 3 : Interactions profond - surface

Stage	Intitulé du stage	Demandeur	Laboratoires	Date de début
	Influence des exsudats de quatre espèces d'arbres de milieu tempéré (pin sylvestre, épicéa, chêne sessile et hêtre) sur les flux de méthane d'un sol forestier.	Nicolas Bras	Silva	janvier 2021
	Nature, origine et signification des indices d'hydrocarbures du bassin de Pechelbronn	Laurie Tchang-Tchong	GeoRessources	janvier 2021
	Modélisation de la rugosité des joints rocheux à différentes échelles. Comparaison approche milieu équivalent et milieu discontinu par modélisation 3D.	Emilio Abi Aad	GeoRessources	janvier 2021
	Impact des fluctuations du niveau d'une nappe phréatique induites par les changements climatiques sur la remobilisation des hydrocarbures pétroliers (LNAPL).	Amélie Cavelan	LIEC GeoRessources	janvier 2021
	Interactions tectono-sédimentaires du bassin Carbonifère-permien sarro-lorrain	Romain Hemelsdaël	GeoRessources	janvier 2021

Thèse - Métrologie, monitoring et modélisation des processus de transfert des gaz CO₂ et CH₄ au sein du système géosphère/biosphère (- 20 / + 10 mètres)

Thèse démarrée en novembre 2017

Encadrement
Philippe de Donato GeoRessources
Laurent Saint-André BEF



Didi Adisaputro

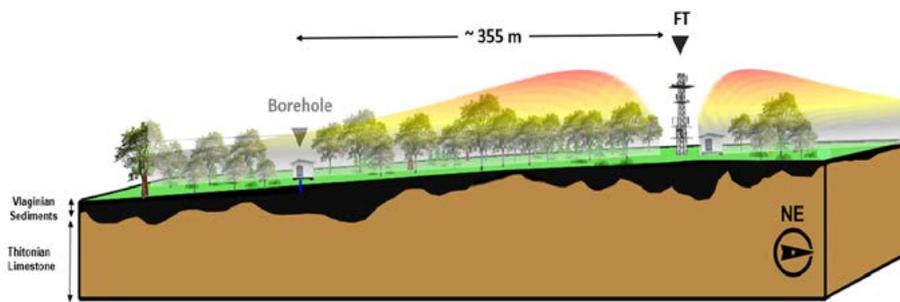


Fig 1 A vertical section of the soil profile of Tithonian limestone surmounted by valanginian sediments. On the surface, borehole measurement and a lattice tower (FT) were constructed with the distance around 355 m. The colour gradation represents a flux footprint estimation, A two-dimensional parametrization model was used to estimate the flux footprint (Kljun et al., 2015) run on R software (R Core Team, 2020).

This study is a continuation of our previous geochemical monitoring finding at the injection wells of Rouse 1 (Total CCS pilot, Lacq-Rouse, France) where it was identified that the soil CO₂ mole fraction (χ_c) evolution in subsoil was negatively correlated with the level of the water table and the CO₂ sources were attributed to the CO₂-rich aquifers. However, it is still unclear whether this relationship exists in the forest ecosystem, representing a significant proportion of the CO₂ atmospheric budget. For this reason, this thesis focuses on monitoring the gas exchange and its main driver of the transport process between soil (-1 m), subsoil (-6 m), and vegetation cover. We developed and implemented an in-situ geochemical monitoring system for continuous monitoring of CO₂ mole fraction in the subsoil coupled with a micrometeorological monitoring system using a pre-established flux tower in

the forest Ecosystem (Montiers, Lorraine Region, France).

This soil gas measurement infrastructure combining borehole measurement with micrometeorological measurement offers great possibilities for long-term

in-situ and continuous gas monitoring to derive the vertical distribution of CO₂. Thus, this infrastructure allowed the observation of the temporal dynamics in soil-gas CO₂ research. During the study periods, the ecosystem acted as a net carbon sink with a mean annual NEE, GPP, and Reco of -453 ± 122 gC.m⁻².y⁻¹, -1468 ± 109 gC.m⁻².y⁻¹, and 1052 ± 88 gC.m⁻².y⁻¹ consecutively. A comparison of carbon exchange in our site in comparison to the other temperate broadleaved forest that is provided in Fig 2.

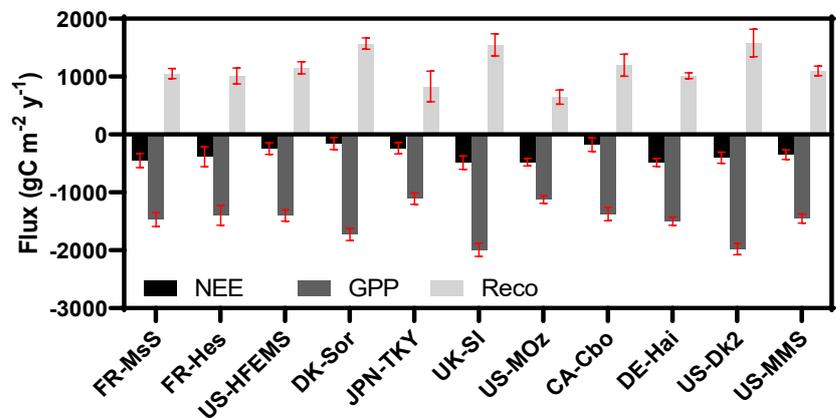


Fig 2. Annual carbon flux, including NEE (Net Ecosystem Exchange), GPP (Gross Primary Productivity), and Reco (Ecosystem Respiration) in a deciduous broadleaved forest. These include our site (FR-MsS) (France-Montiers, n = 6 years), FR-Hes (France, Hesse, n = 10 years), US-HFEMS (Massachusetts-Harvard Forest, n = 13 years), DK-Sor (Denmark-Soroe, n = 13), UK-SI (UK-Straits Inclosure, n = 12), US-MOZ (Missouri-Ozarks, n = 5), CA-Cbo (Canada-Ontario-Borden, n = 18 years), DE-Hai (Germany-Hainich, n = 7 years), US-Dk2 (North Carolina-Duke Forest, n = 8 years), and US-MMS (Indiana-Morgan-Monroe, n = 13 years).

Axe 3 : Interactions profond - surface

As predicted, drought and heatwave will be more frequent in the future. The Carbon exchange, climate, and environmental drivers during the drought episodes were compared with long-term reference data recorded from 2014 to 2017. In contrast with some previous research where GPP and Reco parallelly decreased during the drought episodes, our site showed Reco is more sensitive to drought than GPP, resulting in a significant increase in Net Ecosystem exchange. Reco decreased by 20%, and 26% in Summer and Autumn (2018-2019) relative to the reference years (2014-2017). Furthermore, the study combining borehole and micrometeorological measurement (Fig 3) shows strong empirical shreds of evidence that wind turbulence plays a significant role in driving the deep soil CO₂ concentration.

using simultaneous measurement of CO₂ and O₂ (Angert et al., 2015; Sánchez-Cañete, Barron-Gafford and Chorover, 2018; Hicks Pries et al., 2019; Hodges et al., 2019). Hodges et al. (2019) has extensively described some scenarios when ARQ is not equal to 1. The ARQ < 1 can be attributed to the 1) abiotic or chemolithoautotrophic oxidation, 2) carbonate weathering, 3) Dissolution of CO₂ gas in soil water, 4) silicate weathering, and lignin or lipid mineralization. While ARQ > 1 corresponds to 1) heterotrophic activity, 2) degassing of CO₂ rich soil water, 3) carbonates precipitation, and 4) mineralization of mineral acid. In Fig 4, It is clear that the ratio between CO₂ production and O₂ consumption does not follow the theoretical slope of 0.76; instead, the regression line of all data in our site demonstrates a slope of - 0.58.

A similar finding has been reported in a temperate forest with a slope of - 0.8 to - 0.58 and a y-intercept of 12.17 to 16.77 (Hodges et al., 2019). This means the processing controlling subsoil CO₂ in our site was not solely diffusion and aerobic metabolism using carbohydrate (i.e., ARQ = 1, slope = - 0.76).

On our site, the ARQ was lower during summer (ARQ < 1) than winter/spring (ARQ > 1). the ARQ < 1 during wet winter and early growing season can mainly be attributed to the CO₂ dissolution since it has been proven in this study that the CO₂aq were predominantly exhibited the soil-water during wet winter. Moreover, the ARQ > 1 that was found during the growing seasons can be attributed to the increased biological respiration in the soil, such as the root system (Rr) and non-biological source (Rn). It is most likely this significant increase in biological respiration outpace the supply of O₂ through diffusion from the soil surface. These biological origins of soil CO₂ are highly likely increasing air density resulting in gravitational percolation that leads the CO₂ stored in a deeper layer of soil. The relationship of subsoil gases also emphasizes that biogenic components dominate the origins and controlling process of subsoil CO₂ while the geochemical process plays an insignificant role.

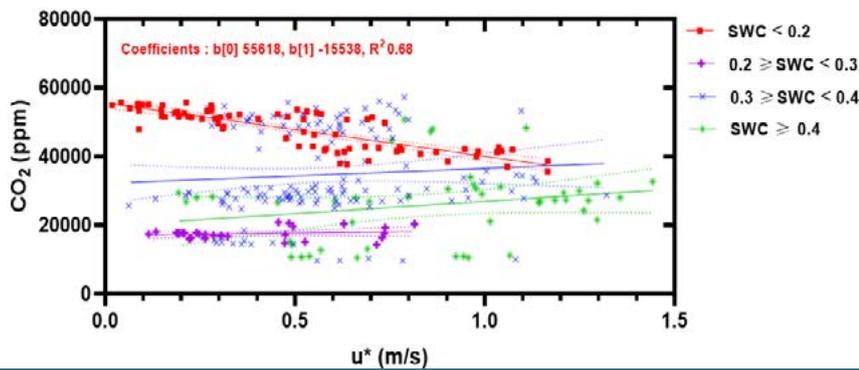


Fig 3. The relationship between hourly CO₂ molar fraction (χ_c) at 6m depth and friction velocity (u*) above the canopy for different levels of SWC (Soil water Content) : SWC<0.2 m³m⁻³ (red, p<0.0001), SWC between 0.2 to 0.3 m³m⁻³ (purple, p=0.35), SWC between 0.3 m³m⁻³ to 0.4 m³m⁻³ (blue, p=0.33), and SWC> 0.4 m³m⁻³ (green, p=0.144).

We hypothesize that this could be due to pressure pumping effects where it decreases the CO₂ molar fraction in the soil during high turbulence and increasing the CO₂ storage in deep soil during low turbulence. It also demonstrates that permeability significantly reduced during wet periods diminishing molecular diffusion and advection. Further investigation was carried out to define the exact sources and controlling processes of subsoil CO₂ that is provided in Fig 4. Apparent respiratory quotient (ARQ) has been recently used to understand biotic controls on soil gases better

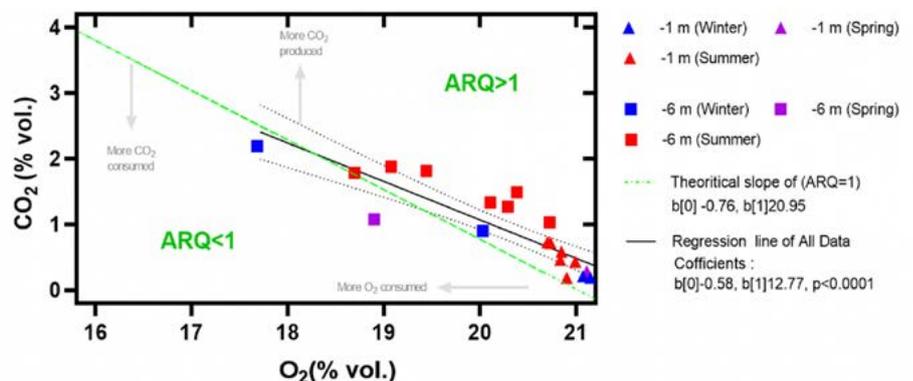


Fig 4. Plot of soil CO₂ and O₂ and theoretical slope governed by diffusion and aerobic respiration (green line). Point colour corresponds to seasons, and point shape indicates the depth of gas samples. The fitted regression of all data is provided in the black line and the dotted black line (95% confident interval). Point fall above the theoretical line has an ARQ value of more than one, and point fall below the theoretical line has an ARQ value of less than 1.

Thèse - 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 sylvoécორégions du nord-est de la France

Thèse démarrée en mars 2018

Encadrement

Caroline Plain Silva

Daniel Epron Silva

Contexte

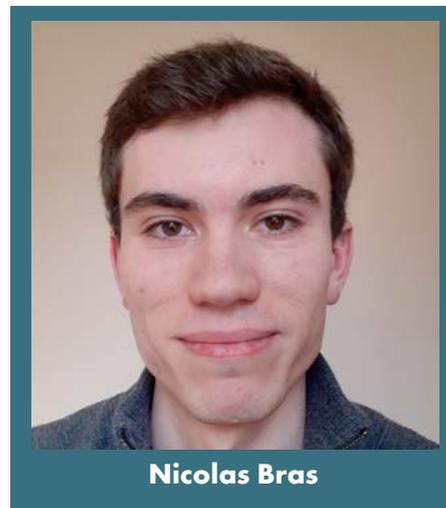
Les sols consomment chaque année près de 30 millions de tonnes de méthane. Il apparaît que parmi les sols et les écosystèmes auxquels ils sont liés, les sols forestiers ont le potentiel de consommation de méthane le plus important. Les sols forestiers sont donc porteurs d'un service écosystémique à caractériser et à préserver.

Les arbres sont capables de sécréter différentes molécules organiques via les racines (exsudats) ou la décomposition de litières. Parmi ces composés les monoterpènes sont des composés organiques volatiles (COV) connus pour inhiber la consommation de méthane par les sols. L'horizon organique du sol influence également sa consommation de méthane, en lien avec sa porosité. En effet, il a été montré que la consommation de méthane serait plus faible dans l'horizon organique que dans l'horizon minéral en raison de la diffusion plus lente du méthane et du dioxygène lié à une porosité en air plus faible. Les sols ayant un horizon organique plus épais consommeraient donc moins de méthane. L'azote minéral est un autre facteur qui peut affecter la consommation de CH_4 , entraînant soit une inhibition soit une stimulation.

L'espèce d'arbre d'un peuplement forestier influence fortement le sol sur lequel elle se développe, jouant sur

des facteurs tels que les COV présents dans le sol, l'horizon organique ou l'azote minéral. Il semblerait que la sécrétion de COV soit très variable entre espèce, avec notamment une plus forte production de monoterpènes pour les conifères que pour les autres espèces, corrélée à une consommation de méthane plus faible. Au niveau de l'horizon organique, il apparaît que celui-ci est plus épais sous peuplement de conifères que sous peuplement de feuillus en raison d'une accumulation de matière organique accompagnée d'une plus faible dégradation de cette dernière. L'espèce d'arbre présente peut influencer sur la teneur en azote minéral du sol en influençant les bactéries du sol et notamment celles du cycle de l'azote. Des différences de minéralisation entre peuplements de plusieurs espèces ont été observées, avec notamment une minéralisation plus forte pour les résineux que pour les autres espèces pouvant s'accompagner d'une plus forte teneur en azote inorganique du sol.

L'objectif de cette expérimentation est de déterminer l'impact de l'essence forestière sur la consommation de méthane. Nous avons émis l'hypothèse que la consommation pourrait être plus forte pour des peuplements de feuillus que pour des peuplements de conifères en raison (1) d'une sécrétion plus importante de monoterpènes inhibiteurs par les conifères et (2) en raison d'un



Nicolas Bras

horizon organique plus épais pour ces mêmes peuplements ainsi que (3) d'une plus faible teneur en azote minéral pour les peuplements de feuillus.

Méthode

Cette étude a été réalisée dans la forêt domaniale de Hanau 1 sur un ensemble de douze parcelles. Ces parcelles étaient divisées en un triplicat de quatre parcelles accolées. Dans chaque ensemble de quatre parcelles il y avait une parcelle de hêtre, une parcelle de chêne sessile, une parcelle de pin sylvestre et une parcelle d'épicéa. Ces parcelles ont été choisies par une étude des documents d'aménagement ONF et un repérage sur site afin d'obtenir des ensembles de parcelles en peuplement fortement dominant d'une essence donnée avec des topographies et types de sols similaires pour mieux observer l'effet espèce recherché. Nos échantillons de sol ont été prélevés au cours de l'été 2020, pendant une période de forte porosité en air.

Des échantillons de sols (5 cm de profondeur) sont prélevés et incubés. Les variations de la concentration en

Axe 3 : Interactions profond - surface

méthane en fonction du temps dans la chambre d'incubation sont mesurées pour estimer la consommation de méthane de l'échantillon de sol. Les monoterpènes des sols et litières de nos peuplements seront mesurés puis identifiés par mesure GC-MS. Nous avons également prélevé pour ces quatre espèces, 18 échantillons par peuplement : six à 5 cm, six à 10 cm et six à 15 cm de profondeur.

Résultats

Cette première année, plusieurs résultats ont été obtenus suite à l'étude de l'effet de l'âge du peuplement sur la consommation de méthane. Un article est en cours de rédaction, dont les principales conclusions sont :

- L'âge du peuplement n'a pas d'effet sur la consommation de méthane
- La porosité en air est le principal driver des variations spatiales et temporelles de la consommation de méthane

Les prochains travaux porteront sur l'effet espèce du peuplement forestier sur la consommation de méthane

Les premiers résultats de consommations de méthane montrent une consommation de méthane significativement plus élevée pour les peuplements de hêtre

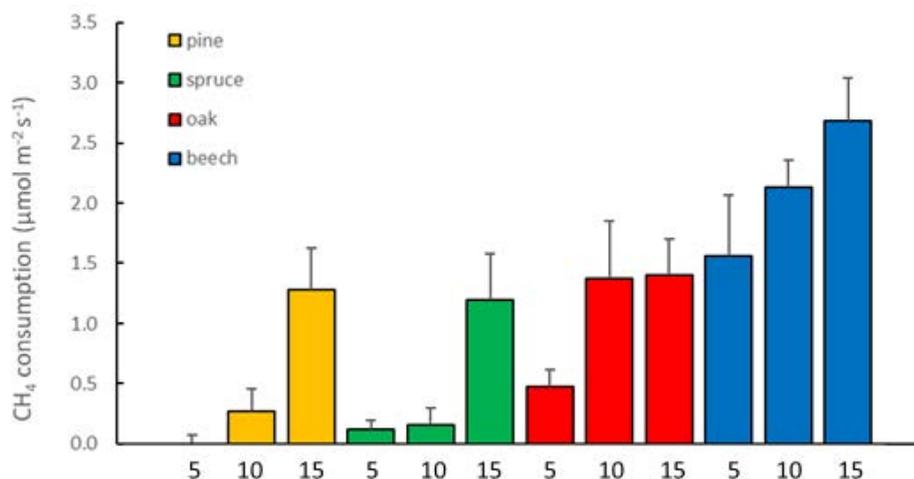


Figure 2 : Consommation de méthane sur les 5, 10 et 15 premiers centimètres du sol pour chaque essence forestière. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard.

par rapport aux autres espèces (Fig. 1). Ce résultat n'a pu être expliqué pour l'instant avec les facteurs mesurés.

Les résultats à différentes profondeurs montrent toujours une plus forte consommation dans les parcelles de hêtres et une consommation qui augmente avec la profondeur, là encore sans que les facteurs mesurés à ce jour ne puissent l'expliquer (Fig. 2).

effectués par q-PCR. Ces facteurs, ainsi que d'autres mesures (porosité, pH, azote minéral, etc.) devraient permettre d'expliquer plus précisément les résultats obtenus.

Perspectives pour 2021

Dans les prochains mois, des mesures de monoterpènes seront réalisées par GC-MS et des mesures d'abondance bactérienne de méthanotrophes seront

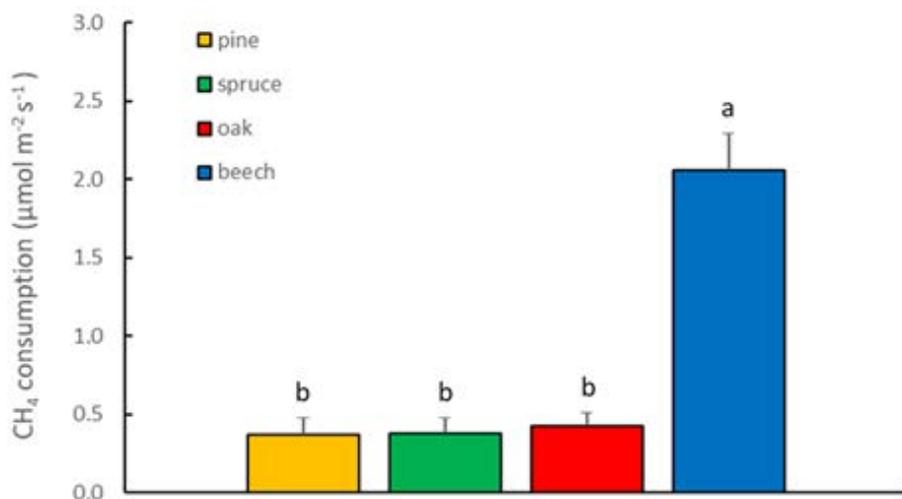


Figure 1 : Consommation de méthane selon l'essence forestière du peuplement forestier. Valeurs moyennes de chaque peuplement (n = 36). Les différentes lettres représentent les différences de consommation significatives ($\alpha < 0.05$). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard.

Stage - Influence des exsudats de quatre espèces d'arbres de milieu tempéré (pin sylvestre, épicéa, chêne sessile et hêtre) sur les flux de méthane d'un sol forestier.

.....
Stage de M2 démarrant en janvier 2021

Encadrement
Nicolas Bras Silva
Caroline Plain Silva
.....

Contexte

Les travaux de ma thèse ont pour objectif d'identifier et de caractériser les facteurs majeurs responsables de la variation spatiale de consommation du méthane par les sols forestiers. Cet objectif se traduit par différentes questions de recherches :

- Quels sont les facteurs explicatifs des variations spatiales de la consommation du méthane ?
- Quel est l'impact de l'âge du peuplement forestier sur la consommation de méthane ?
- En quoi l'essence forestière influence-t-elle la consommation de méthane ?

En répondant à cette dernière question, j'ai récemment montré que le sol sous hêtraie (peuplement monospécifique) avait une consommation de méthane significativement plus importante qu'un sol sous pessière, chênaie ou pinède. Suggérant donc que le hêtre crée des conditions plus favorables à la méthanotrophie (ou défavorables à la méthanogénie) que les autres espèces qui créent, elles, des conditions défavorables à la méthanotrophie (ou favorables à la méthanogénie).

Objectif du stage

Les arbres peuvent exsuder au niveau racinaire des composés solubles ou

des organiques volatiles (COVs) qui peuvent avoir un effet sur les populations de bactéries méthanotrophes ou méthanogènes vivant dans le sol. Il a été montré que les acides organiques pouvaient inhiber l'activité des bactéries méthanotrophes alors que les composés phénoliques la favoriseraient. En outre, la libération de composés carbonés de faible poids moléculaire (sucres, acides aminés, acides organiques) constitue la source principale de substrat pour les bactéries méthanogènes dont le développement pourrait être alors stimulé.

Le stage de Master 2 proposé aura pour but d'étudier l'influence des exsudats de quatre espèces d'arbres de milieu tempéré (pin sylvestre, épicéa, chêne sessile et hêtre) sur les flux de méthane d'un sol forestier.

Les questions spécifiquement posées seront : (1) Quelles molécules et quelles concentrations sont exsudées par les quatre espèces d'arbres ? (2) Comment ces molécules influencent-elles les flux de méthane ?

Tâches à réaliser

La récupération des exsudats racinaires sera effectuée sur le dispositif expérimental en forêt domaniale de Hanau 1. Les expérimentations consisteront à (1) mettre au point la méthodologie de récupération des

exsudats racinaires et la tester (après une synthèse bibliographique des différentes méthodes existantes) ; (2) identifier et quantifier les exsudats racinaires. Une identification large des métabolites sera effectuée lors du stage de M2 pour identifier les composés majoritaires et spécifiques à une espèce ; (3) Tester les effets des exsudats sur les flux de méthane. Les métabolites seront appliqués sur des échantillons de sol nu, et placés dans un incubateur à 20°C. L'évolution des concentrations en méthane et en CO₂ suite à l'application des différentes solutions nous permettra de calculer des flux nets de consommation ou de dégagement de ces gaz.

Connaissances et compétences développées

Le stagiaire devra réaliser des campagnes de terrain en forêt, ce qui lui permettra de développer son esprit pratique, son organisation, sa rigueur, ainsi que son autonomie et sa prise de décision. Il devra manipuler des appareils de mesures de flux de gaz de pointe et devra apprendre à récupérer et traiter les données en utilisant le logiciel R. Pour finir, il devra développer un esprit de synthèse et rédiger un rapport scientifique sur les données acquises lors du stage.

Thèse - Estimation simultanée des paramètres et détection de structures dans les données spatialisées

.....
Thèse démarrée en octobre 2019

Encadrement
Radu Stoica IECL
Madalina Deaconu IECL

.....
Les données hydrogéochimiques reflètent souvent des mélanges entre plusieurs sources. L'analyse de telles données repose sur la détection de ces sources et leur contribution dans chaque prélèvement. La contribution des sources (quand elles sont connues) peut être estimée à partir des données, notamment via des modèles de mélange bayésien. De même, les sources peuvent être détectées à partir des données, que ce soit graphiquement ou via un algorithme.

La connaissance des sources et de leurs contributions permet de mieux comprendre la dynamique des eaux depuis la surface jusqu'à la croûte profonde.

L'objectif de la thèse est de développer une méthode pour détecter les sources à partir de données hydrogéochimiques. Notre méthode se doit de détecter les sources en se reposant sur un modèle mathématique afin de supprimer la subjectivité présente lors de la détection graphique des sources. De plus, notre méthode se doit de détecter les sources de manière flexible, c'est-à-dire sans fixer a priori le nombre de sources.

Notre travail présente une méthode bayésienne de détection de sources basée sur les processus ponctuels. Cette méthode est inspirée des méthodologies de détection de pattern en analyse d'image, en épidémiologie et en

astronomie.

En géologie, la détection des sources se fait généralement sur des plans, dont chaque dimension représente la mesure d'un paramètre hydrogéochimique donné (concentration, ratio isotopique, etc.). Nous restreignons notre modèle à des plans où le mélange des sources n'a produit aucune réaction chimique, ce qui est valable le plus souvent pour des éléments dits "conservatifs" (comme les halogènes par exemple).

Le modèle que nous voulons proposer doit contenir toutes les connaissances que nous avons sur la détection graphique des sources. Pour cela, notre modèle est construit avec pour point de départ quatre hypothèses. La première hypothèse est que le nombre de sources bien qu'inconnu doit être minimisé. La seconde hypothèse est que deux sources ne peuvent pas être trop similaires en terme de composition. La troisième hypothèse est que les sources doivent être assez proches des données. La quatrième hypothèse est que les données sont expliquées par le pattern des sources (i.e. les données sont le résultat d'un mélange de tout ou d'une partie des sources du pattern) lorsque les données sont dans l'enveloppe convexe des sources.



Christophe Reype

Ces hypothèses nous permettent de considérer le pattern de sources comme la réalisation d'un processus ponctuel de Gibbs de densité de probabilité :

$$p(\mathbf{x}|\theta) = \frac{\exp[-U(\mathbf{x}|\theta)]}{Z(\theta)}$$

avec \mathbf{x} le pattern de sources, θ un vecteur de paramètres qui définit notre modèle, U la fonction énergie qui définit notre modèle et Z la constante de normalisation.

Le pattern de sources qui a créé les données est donc le \mathbf{x} qui maximise $p(\mathbf{x}|\theta)$ ou qui minimise $U(\mathbf{x}|\theta)$.

La détection de sources selon notre modèle consiste donc en trois points. Tout d'abord, il faut construire la probabilité de densité $p(\mathbf{x},\theta)$. Ensuite, il faut la simuler au moyen d'un algorithme de Metropolis Hastings qui utilise une dynamique de Monte-Carlo par chaînes de Markov. Enfin, il faut rechercher le maximum de $p(\mathbf{x}|\theta)$ par l'algorithme dit de recuit simulé, qui est un algorithme d'optimisation globale.

Axe 3 : Interactions profond - surface

En appliquant le modèle ainsi créé sur des données simulées, nous avons déterminé le vecteur de paramètres θ propre à chaque jeu de données. Nous avons pu remarquer que si les jeux de données étaient normalisés, θ était du même ordre de grandeur pour toutes les jeux de données, alors que θ peut passer du simple au triple d'un jeu de données à l'autre si il n'y a pas de normalisation. Il a ainsi été possible de déterminer θ pour des données réelles.

La grande force de ce modèle est le fait qu'il permet d'intégrer des connaissances, notamment géologiques, sous forme de loi à priori. De plus, la détection se fait à partir de caractérisations morphologiques (comme lors de la détection graphique), mais aussi statistiques.

Cependant, la recherche du paramètre θ doit encore être améliorée. En effet, pour le moment, il est choisi par l'expérimentation et la validation visuelle. Par la suite, nous souhaiterions ajouter des connaissances sur θ au travers d'une loi à priori.

Les premiers résultats de la thèse, décrits dans l'article de conférence [Reype et al., 2020], ont été présentés lors de la conférence intitulée RING Meeting, qui a eu lieu entre le 7 et le 11 septembre 2020 à Nancy. Ces résultats sont obtenus en appliquant notre modèle à des plans.

Les données étant multi-dimensionnelles (généralement il y a plus de deux paramètres hydrogéochimiques), une généralisation de notre modèle en K dimensions est en cours. Nous avons déjà construit un modèle théorique et nous commençons son codage. Une fois que ce nouveau modèle aura fait ces preuves, nous comptons le soumettre dans un journal international avec comité de lecture.

L'étape suivante de la thèse est l'estimation des paramètres θ . Ceci

permettra d'effectuer une détection simultanée des sources et des paramètres du modèle associé et ainsi estimer la contribution des différentes sources aux données résultant de leur mélange.

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

Thèse démarrée en octobre 2019

Encadrement
Raymond Michels GeoRessources
Pierre Faure LIEC

L'étude bibliographique

Les premiers six mois de thèse ont été consacrés à l'étude bibliographique du Fossé Rhénan dans le but de retracer son histoire tectono-sédimentaire. Cette étude a conduit à la rédaction d'une synthèse basée sur les différents stades de rifting du bassin sédimentaire. La période pré-rift, qui englobe le Paléozoïque et le Mésozoïque, met d'abord l'accent sur l'héritage structural paléozoïque puis sur l'importance de l'estimation de la période d'érosion d'âge Crétacé-Paléocène. Pour la période syn-rift, la synthèse s'est focalisée sur le secteur de Pechelbronn et retrace les paléo-environnements principaux pour quatre étapes de rifting qui correspondent à :

1. la phase d'initiation principale du rift,
2. la phase de subsidence majeure,
3. la phase de transtension et
4. la phase de changement majeur dans la cinématique du rift.

Au cours de cette synthèse, une controverse majeure a été soulevée en ce qui concerne l'extension du/des système(s) pétrolier(s) du secteur. Alors que certains auteurs ont publié des valeurs de pouvoir réflecteur de la vitrinite (PRV) qui traduisent des maturités suffisantes pour la génération d'huile et/ou de gaz, d'autres ont soutenu que ces mêmes roches-mères sont sous-matures. Il demeure donc incertain si les transferts s'opèrent sur des courtes ou longues distances. Un

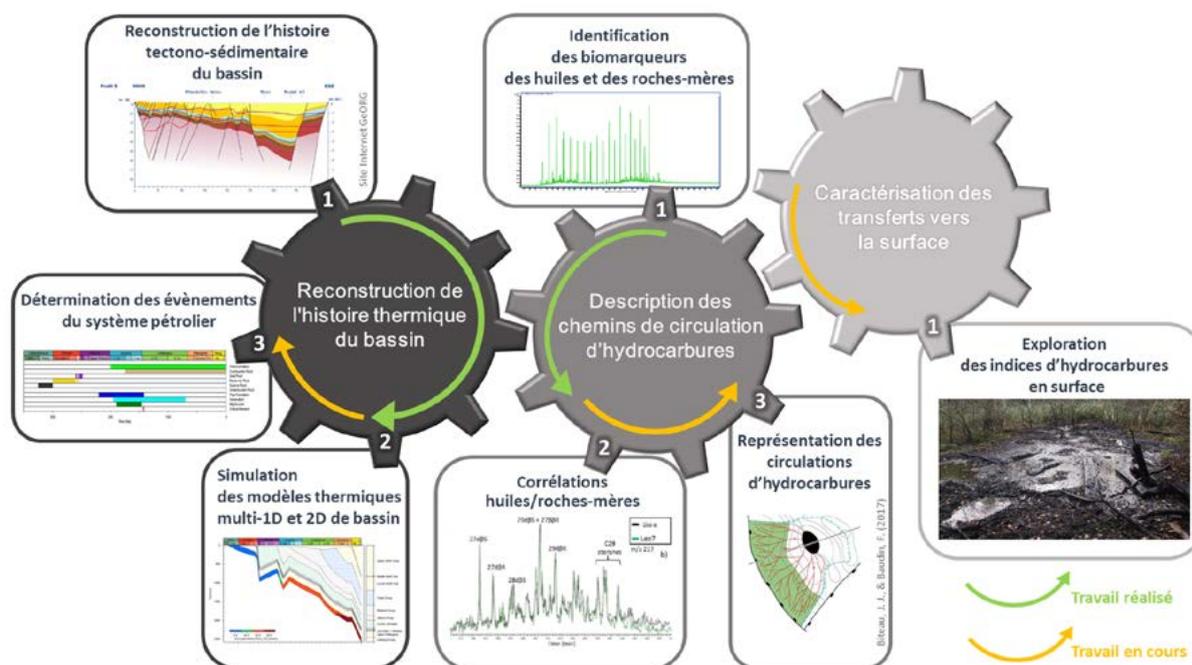


Laurie Tchong-Tchong

résumé a été déposé sur ce sujet à la RST 2020, qui depuis a été reportée en octobre 2021.

Prélèvements d'échantillons

Afin de répondre à cette inconnue, une mission de terrain, réalisée fin septembre, a permis de récolter quelques échantillons d'huiles et d'eaux aux alentours de Merkwiller-Pechelbronn. Les eaux sont actuellement en train d'être analysées à STEVAL pour



connaître leur composition anionique (F⁻, Br⁻, Cl⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻) et cationique (Si, Fe, Al, Mn, Ti, Mg, Ca, K, Na), leur pH et leur salinité globale. Les huiles sont en train d'être préparées pour les analyses GC-MS.

Les distributions moléculaires (chromatogrammes) seront ensuite étudiées afin de les caractériser et de les classer. En parallèle, des roches-mères potentielles de la zone d'étude ont été broyées et préparées pour être analysées par pyrolyse Rock-Eval et par GC-MS. Ces analyses sont réalisées dans le but d'évaluer le potentiel pétrolier et le degré de maturité thermique de la matière organique



Résurgence de pétrole dans la forêt de Merkwiller-Pechelbronn

Modélisation thermique du bassin

En parallèle de ce travail expérimental, un travail de modélisation thermique de bassin a débuté sur le logiciel PetroMod. Pour le moment, les modèles 1D se basent sur les données en libre accès sur le site du BRGM et sur les études bibliographiques. Les modèles 2D se basent sur des coupes géologiques extraites depuis le site du projet européen GeORG. Le but est de reconstruire l'histoire thermique du bassin, de déterminer le paléocouvrement créacé et de proposer des chemins préférentiels de circulation d'hydrocarbures.

Stage - Nature, origine et signification des indices d'hydrocarbures du bassin de Pechelbronn

Stage de M2 démarrant en janvier 2021

Encadrement

Laurie Tchang-Tchong GeoRessources

Raymond Michels GeoRessources

Pierre Faure LIEC

Objectifs des travaux de recherche

Les travaux de recherche ont permis de réaliser une synthèse bibliographique de l'évolution tectono-sédimentaire du Fossé Rhénan et en particulier du secteur de Pechelbronn. Cette synthèse géologique permet de contraindre dans un premier temps l'évaluation du/des système(s) pétrolier(s) du secteur. Dans les prochains mois, l'idée est d'affiner cette évaluation à partir de l'analyse géochimique des échantillons de roche mère déjà prélevés à l'affleurement, mais aussi à partir de la prospection et de l'expression des indices d'hydrocarbures. Pour ce faire, les huiles collectées au préalable devront être caractérisées en fonction de leurs compositions géochimiques et de leurs bio-altérations.

Les objectifs scientifiques

1. Connaître le nombre de famille d'huiles qui existent dans la zone d'étude ;
2. Comparer les résultats des

3. Proposer des relations entre la/les cuisine(s) pétrolière(s) et les pièges, dans l'ensemble de la zone de drainage du/des système(s) pétrolier(s).

Tâches à réaliser

- Géochimie organique : caractérisation des huiles prélevées in situ, maturations artificielles de roches mères, évaluation des différents éléments du système pétrolier
- Géologie pétrolière : intégration des données dans un modèle thermique de bassin (PetroMod)



Résurgence de pétrole dans la forêt de Merkwiller-Pechelbronn

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

Thèse démarrée en octobre 2019

Encadrement

Marie-Pierre Turpault BEF

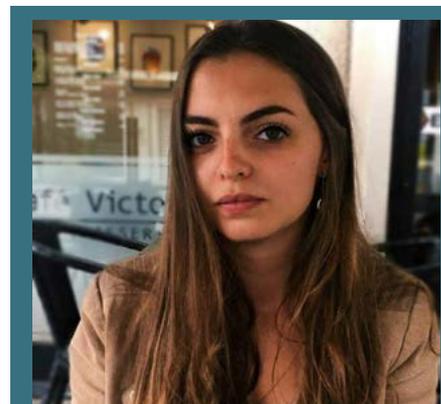
Philippe de Donato GeoRessources

Objectifs des travaux de recherche

Une année s'est écoulée depuis le début de ma thèse. Durant cette année, j'ai effectué divers travaux qui m'ont permis de m'approprier pleinement et d'affiner mon sujet de thèse.

J'ai d'abord participé activement à la fin de construction d'une des expériences clés de mon sujet, à savoir le Dispositif Sécheresse (gestion INRAE-BEF) sur le site expérimental de Montiers (site cogéré par l'INRAE, l'ANDRA et l'ONF et faisant partie du réseau de recherche AnaEE), implanté au cœur de la forêt domaniale de Montiers-sur-Saulx. Ce dispositif, unique en Europe, est constitué d'une placette avec un toit ouvrant et d'une placette témoin (400

m² chacune), et est fortement instrumenté afin de réaliser un suivi détaillé des cycles biogéochimiques. Cette expérience a pour but de supprimer l'eau arrivant au sol durant une partie du printemps et de l'été et de suivre les conséquences sur les cycles des éléments (prélèvements, immobilisation dans l'arbre, mise en réserve, retour au sol, libération par l'humus, par le sol et perte par drainage) au sein d'un écosystème forestier. La mise en place fut longue et complexe, notamment en raison des conditions sanitaires depuis mars dernier. Mais grâce au travail de toute l'équipe, l'expérience a finalement pu débuter le 12 juin 2020 et son inauguration, le 16 septembre 2020, fut un franc succès.



Jeanne Touche

Résultats de la première année

Au cours de cette première année j'ai également travaillé au prélèvement et à l'analyse d'échantillons (sol, racines fines, humus, chute de litière, feuilles fraîches et diamètre des arbres à 1m30) sur une autre placette de forêt sur le site Expérimental de Montiers. Cette expérience, en fonctionnement depuis 2015, est dotée d'un toit ouvrant de 75 m², ayant inspiré celui du Dispositif Sécheresse mais est non instrumentée comparé à ce dernier, ce qui limite le suivi des cycles biogéochimiques.

L'analyse des données récoltées nous a permis d'observer l'effet de cinq années de sécheresse consécutives (trois mois et demi de sécheresse complète en moyenne chaque année) sur le fonctionnement biogéochimique d'un écosystème forestier. Ceci a notamment mis en évidence une diminution de l'accroissement de biomasse aérienne (et du stockage de C associé) de 64 % comparé



Dispositif sécheresse lors de l'inauguration du dispositif en septembre 2020, ici un focus sur le toit ouvrant en position ouvert

Axe 3 : Interactions profond - surface



Jeanne Touche présentant ses travaux de recherche lors de l'inauguration du Dispositif Sécheresse

à une placette témoin. Ce résultat a été présenté lors du séminaire scientifique organisé par DEEPSURF le 15 octobre dernier, autour du sujet suivant : « Le stockage de carbone, une solution pour la transition écologique ? ».

Associé à cette baisse de croissance, un dépérissement important du peuplement au bout de cinq années de sécheresse est observé. L'analyse des résultats de cette expérience a également permis

de mettre en lumière une carence en nutriments sous l'effet des sécheresses consécutives, notamment une carence en potassium (K), un élément majeur pour le bon développement des plantes et leur résistance face aux stress hydriques.

Les résultats acquis sur le prototype sont suffisamment originaux et concordants pour faire l'objet d'un article scientifique, traitant des effets de cinq

années de sécheresses consécutives sur le fonctionnement d'un écosystème forestier.

Perspectives pour l'année 2021

Cette deuxième année de thèse débute donc par la rédaction d'un article.

Elle se poursuivra par l'analyse des données de l'année 2020 récoltées sur le Dispositif Sécheresse ainsi que l'étude approfondie des cycles d'éléments au niveau d'une 3^{ème} approche du site expérimental de Montiers : les trois stations (sur trois sols différents) de suivis biogéochimiques d'un hectare chacune, en fonctionnement depuis 2012. Des bilans seront réalisés en fonction des années sèches (précipitations entre mai et septembre < 350 mm) et des années humides (précipitations entre mai et septembre > 400 mm) afin d'observer d'éventuels effets de variations de précipitations interannuelles sur l'évolution de ces cycles.



Vue d'ensemble du dispositif sécheresse en position fermée lors de l'inauguration en septembre 2020

Thèse - Nouveaux capteurs de type HEMT pour l'analyse biogéochimique in-situ

Thèse démarrée en octobre 2019

Encadrement
Jacques Pironon GeoRessources
Simon Gauthier Institut Lafayette

Context

This thesis work, involving GeoRessources lab, Institut Lafayette, Solexperts and 45_8 Energy is marching towards the development of an innovative class of semiconductor gas sensors based on High Electron Mobility Transistors (HEMT) for complex geological environments.

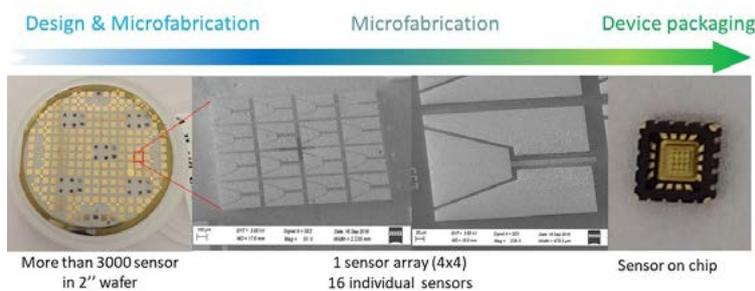
The high sensitivity and accurate selectivity to continuous monitoring of gases compositions in vapor or liquid phases in the geological environment is a major challenge for the community: the monitoring of underground extraction or storage operations requires ideally stable measurements over long periods of time (several years), remote search ability, wide ranges of concentrations (from ppm to percent) coverage and should be inexpensive.

The most frequently used ones for detecting and measuring underground gases are based on Non-dispersive infrared spectroscopy (NDIR), Raman gas cells, Mass spectroscopy or gas Chromatography. However, these techniques are not yet well adapted for the on-line measurement at a deep depth. These semiconductor sensors (AlGaIn/GaN-based HEMT) outstanding physical properties allow the devices to deal with the high depth

conditions (heat, pressure, corrosive fluids) as well as superficial ones (cold, humidity, biological contaminations).

Report on Activity

My first year includes various activities. The first one was to proceed to hands-on trainings on microelectronic microfabrication technologies like optical lithography, metallization, mesa isolation, (sputtering, e-beam evaporation, thermal evaporation), material dry and wet etching, rapid thermal annealing, characterization tools (AFM, SEM, profilometer, 4-point probe station, optical microscope), wire bonding in a clean room environment at Institute Lafayette, Metz.



I have led our new sensor technology design, considering the highest sensitivity and lowest non-linearity. 20 different complete new designs of sensors with multiple pattern of integrated micro-heater are included in the new layout. We expect that being properly functionalized those sensors will add new degrees of freedom for the community of the gas sensors.



Mohammad Iktiham bin Taher

I have participated as well to gas setup design and assembly with the team. A multiple test bench with controlled temperature, pressure and humidity has been implemented in our lab in order to be able to mimic real underground environments. The advanced valve system, the data acquisition and visualization capabilities are PC-controlled using a software which has been developed under LabVIEW. Multiple chambers have been connected to the system in order to characterize several sensors in parallel.

My midterm objective is to implement the sensors into a completely new and unique borehole platform located in Vandœuvre-lès-Nancy offered by the company Solexperts through a drilling depth of 50 m. The borehole is cased with an internal diameter of about 110 mm and has injection lines allowing the injection of fluids (solution with dissolved gas, or gas alone) at controlled temperature distributed at different depths.

Thèse - Traçage isotopique continu du transfert des fluides crustaux vers la surface en relation avec les aléas naturels (sismique, volcanique) ou anthropique

.....
Thèse démarrée en octobre 2019

Encadrement

Raphaël Pik CRPG

Antonio Caracausi INGV_ Université de Palerme

.....

Context

$^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios from groundwater in Italy are monitored by the INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) through discrete sampling at seismically and volcanically active zones. From the data collected, researchers identified correlations between variations in $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios and earthquakes and eruptions, prior and/or during their occurrence. The sampling frequency in the seismic zone of the Umbria-Marche region varies from seasonal or monthly to weekly at most. During periods of unrest, groundwater at Stromboli and gas from soil, mud volcanoes, and a water canal at Etna, are sampled twice a week. At Etna, during periods of quiescence, sampling is performed twice a month, and once a month at Stromboli.

An uninterrupted sampling system has the potential to improve the monitoring at the previously mentioned and other sites of interest, providing key information on processes of short time-scales and their long-term geochemical backgrounds. Unlike the continuous CO_2 monitoring networks installed at various volcanoes and seismic regions, real-time analysis of isotopic ratios in the field remains unattainable. Continuous sampling, on the other hand, is possible using SPARTAH, an apparatus designed by Barry et al. (2009) for automatic groundwater sampling aiming future He analysis in the laboratory (Fig. 1).

SPARTAH consists mainly of a high-power motor, an uninterrupted power supply for eventual backup power, and a syringe pump linked to coils of Cu tubes. Before pumping, the Cu tubes are filled with deionized (DI) water which is drawn into the syringe at a rate established by the user. The space previously occupied by DI water is thus replaced by water from the well.

This project aims to comprehend the exchange and transfer of fluids to the surface in short time-scales. With this knowledge, we hope to better constrain the sources and mechanisms involved in volcanic and seismogenic systems and potentially improve the forecasting of such hazards. In order to achieve this goal, the study will focus on improving the continuous sampling apparatus (SPARTAH) and installing it at sites of interest. Targeted areas are fault zones in northern Iceland and in the Central Apennines (Italy), and volcanic zones in Italy. Future development of a method suited for monitoring of disturbances due to subsoil coal gas exploitation is also planned to be implemented in the Lorraine region (France).

Report of activities

Due to the confinement period and travel restrictions, I have very limited data for my thesis. I was not able to sample our targeted areas or install the equipment in the field abroad - Italy and Iceland.



Carolina Dantas Cardoso

However, in Iceland, we (me and my supervisors) established a collaboration with local geoscientists who performed the isotopic survey and installed SPARTAH, the continuous sampling apparatus, at borehole HA-01. I am currently analysing these samples at CRPG.

We also hired a local contractor in Iceland that samples borehole HA-01 weekly; the first sample was obtained on June 24th 2020 at 15h45 (local Icelandic time), shortly after an earthquake swarm that occurred on June 19th and 20th, three above magnitude 5, and over 20 km off shore the town of Siglufjörður. The Icelandic Met Office also reported several earthquakes with magnitude up to 4.2 in the morning of June 24th. I analysed this sample and its result - extremely low $^3\text{He}/^4\text{He}$ and low $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ratios - is contestable due to the possibility of air contamination. It would be necessary to have more samples prior to this date to establish if the result is due to a real anomaly or contamination.

Axe 3 : Interactions profond - surface



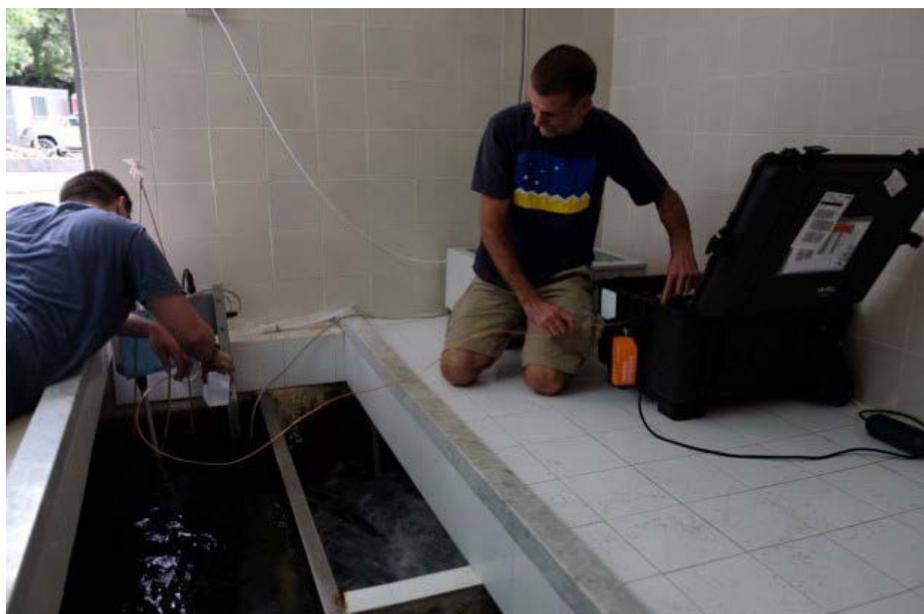
Figure 1 SPARTAH with all of its components: the Harvard syringe apparatus with syringe, Cu tubes, and power source inside a Pelican case. Picture from Barry et al. (2009)

The remaining samples are from after the earthquake swarm and show $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ratios similar to those I obtained for the "background" values from July 2015 to February 2016.

I also performed an experiment at CRPG with the SPARTAH apparatus located in Nancy with the intention to check if it worked properly and the stability of the samples stored in the Cu tubes over long periods of deployment prior to clamping. In the scope of the experiment, we aim to identify the shape of the ^4He peaks to identify if He diffusion occurred and if it varies over time. The experiment ended; however, I could not yet analyse the samples because CRPG is not adapted for this type of copper tube. These analyses are to be undertaken at INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) Palermo, Italy, where the access to PhD students was not possible until very recently and now due to travel restrictions in France.

For the near future we intend to install SPARTAH in regions of interest in Italy

and perform isotopic surveys near these sites. It will depend on the status of the current pandemic.



Thèse - Modélisation physique et numérique de la stabilité des ouvrages souterrains

Thèse démarrée en février 2020

Encadrement

Olivier Deck GeoRessources

Marianne Conin GeoRessources

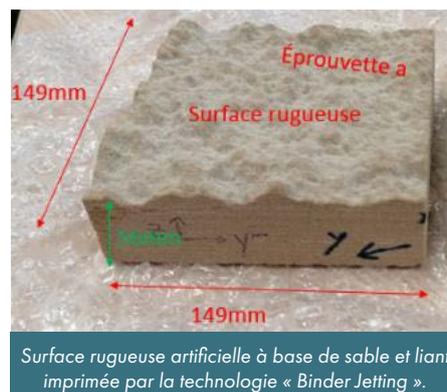
Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche, qui, à long terme, a pour but de réaliser un modèle réduit de 2 m³ permettant d'étudier le comportement d'un massif rocheux et de ses discontinuités, lors de sollicitations dues à des travaux souterrains. L'originalité de ce travail consiste à développer une méthode innovante, basée sur les techniques d'impression 3D, pour introduire explicitement des joints rocheux à propriétés mécaniques contrôlées dans un modèle réduit tout en veillant au respect des lois de similitude qui permettent de traduire les résultats du modèle réduit à l'échelle du prototype (échelle 1).

La stratégie de travail

1. Choix et caractérisation des paramètres d'impression pour la fabrication du modèle réduit. On choisit une technique d'impression 3D sable + liant qui permet de fabriquer des formes complexes.
2. Développement d'une méthodologie pour modéliser la géométrie des discontinuités à l'échelle du prototype et du modèle réduit. On choisit une approche basée sur la dimension fractale.
3. Réalisation de quatre campagnes expérimentales permettant de valider et d'ajuster les paramètres d'impression 3D et paramètres géométriques des discontinuités pour respecter les lois de similitudes entre l'échelle 1 et le modèle réduit

4. Développement d'une procédure d'intégration de capteurs (pression, déformation) dans le modèle réduit, associée à la nécessité d'assembler plusieurs éléments imprimés (quelques dm³) pour réaliser le modèle réduit final (2 m³).
5. Réalisation et tests sur le modèle réduit (2m³) qui sera excavé en son centre avec un réseau de galeries sous contraintes de confinement anisotropes. Les résultats seront comparés à des modélisations numériques pour mettre en évidence les avantages et inconvénients du modèle réduit comparé à une modélisation numérique.

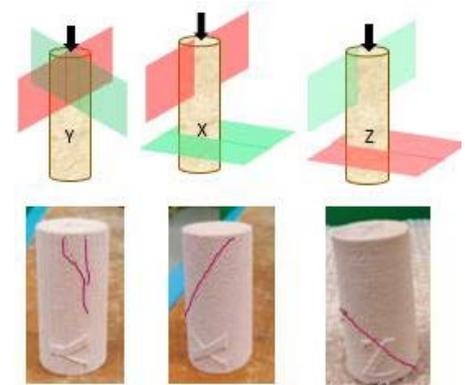
Une partie importante de la bibliographie a été réalisée durant cette première année de thèse sur les thématiques suivantes : application de l'impression 3D en géoscience et notamment en mécanique des roches, comportement mécanique d'un massif rocheux (matrice rocheuse + discontinuités), caractérisation de la morphologie des surfaces rugueuses



Émilio Abi Aad

des joints rocheux et approche par dimension fractale pour leur modélisation géométrique et application des lois de similitude sur les paramètres mécaniques et géométriques d'un joint rocheux.

Les premiers résultats des essais expérimentaux sur le matériau imprimé ont permis de choisir le pourcentage de liant adapté aux objectifs du projet et de mettre en évidence une anisotropie mécanique due à la direction d'impression.



Éprouvettes cylindriques à base de sable et liant imprimée par la technologie « Binder Jetting » et les plans d'anisotropie observés.

Stage - Modélisation de la rugosité des joints rocheux à différentes échelles. Comparaison approche milieu équivalent et milieu discontinu par modélisation 3D

.....
Stage de M2 démarrant en janvier 2021

Encadrement
Emilio Abi Aad GeoRessources
Olivier Deck GeoRessources
Marianne Conin GeoRessources
.....

Objectifs

GeoRessources dispose depuis janvier 2019 d'un Dispositif de Modélisation analogue TRIaxial (DIMITRI), novateur, et conçu pour permettre de réaliser des essais mécaniques sur des modèles réduits d'ouvrages souterrains. Ce dispositif consiste, sommairement, en une presse triaxiale de volume utile comprimé d'environ 2m³ au sein duquel des galeries peuvent être excavées.

Tâches à réaliser

Axe 1 : Modélisation de la rugosité des joints rocheux à différentes échelles

L'objectif est d'étudier la morphologie des joints dans les massifs rocheux et plus particulièrement leur rugosité au moyen de deux approches : géostatistique et théorie fractale. Il s'avère néanmoins que les valeurs obtenues expérimentalement diffèrent selon l'échelle d'étude : échelle millimétrique à l'échelle métrique, voire plus. La rugosité augmente en diminuant la surface d'étude, et les échantillons de joints testés à l'échelle du laboratoire (surface de quelques dm²) sont plus rugueux que ces mêmes joints visualisés à l'échelle d'un massif rocheux (plusieurs m² à plusieurs hm²). La première phase consiste en une étude bibliographique des différentes méthodes de mesure des caractéristiques d'une surface et de

simulation géométrique d'une surface à partir de ses caractéristiques. Cette partie contiendra des modélisations sur Mathematica ou/et Matlab.

La deuxième phase consiste en une caractérisation :

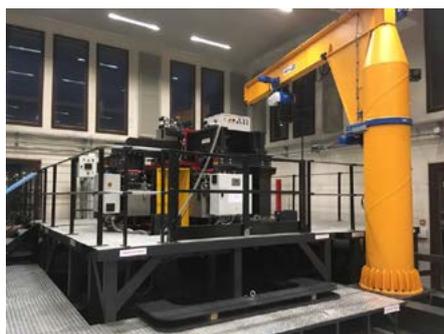
- de l'effet de la variation de la rugosité d'une surface fractale sur les paramètres géomécaniques en fonction de l'échelle d'étude, en se basant sur une étude bibliographique.
- de la représentativité de l'échantillonnage (échelle du laboratoire) d'une surface fractale de plus grande dimension, c'est à dire si ces échantillons admettent les mêmes caractéristiques fractales et géostatistiques et par la suite les mêmes paramètres géomécaniques que la surface initiale de grande dimension.

Axe 2 : Comparaison approche milieu équivalent et milieu discontinu par modélisation 3D

L'objectif de cette deuxième partie est d'étudier l'effet de l'homogénéisation

et de la recherche des propriétés mécaniques requises pour que le modèle réduit se comporte comme le prototype en utilisant la modélisation numérique 2D ou 3D. La démarche serait la suivante :

1. Réalisation d'un modèle théorique réel discontinu avec un réseau de discontinuités bien défini.
2. Sélection des principales familles de discontinuités qui pourront être réellement imprimées. Suite à cette sélection, un modèle 2 sera développé. Dans ce modèle les propriétés de la matrice doivent tenir compte de la présence des discontinuités qui ne sont plus explicitement modélisées.
3. Application des lois de similitudes sur les propriétés afin de développer un modèle numérique réduit idéal : modèle 3.
4. Réalisation d'un modèle numérique réduit réaliste qui tient compte des propriétés géométriques et mécaniques réellement possibles de la matrice et des joints et comparaison avec le 1^{er} modèle.



Post-doc - Nouvelle technologie de capteurs micro-électroniques pour les applications de mesures de terrain de flux d'hélium

Post-doc démarré en septembre 2020
Co-financement 45_8 Energy et Institut Lafayette

Encadrement
Mathieu Lazerges Université Paris Descartes / GeoRessources
Simon Gauthier Institut Lafayette
Thomas Guermont 45_8 Energy



Rouba Alrammouz

Libanaise âgée de 27 ans, je suis titulaire d'un diplôme d'ingénieur en Électricité et en Électronique (2015) ainsi qu'un master recherche en Systèmes embarqués (2016) de l'Université Libanaise, au Liban. J'ai obtenu également, en 2019, un doctorat en Électronique de l'Université de Montpellier et de l'Université Libanaise. Mes travaux ont été centrés sur l'étude de la faisabilité d'un système de détection de gaz flexible à base de dérivés de graphène intégré dans du papier.

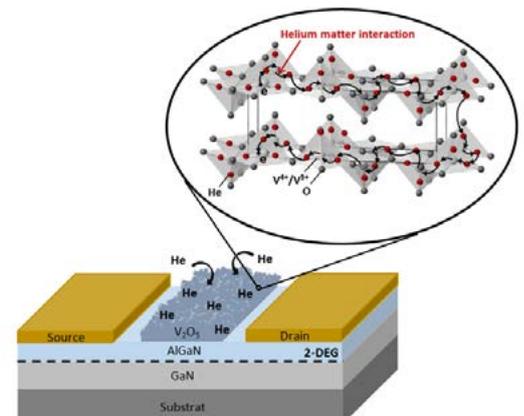
Les préoccupations actuelles de la prospection géologique se focalisent sur la détection et la gestion de ressources non-conventionnelles comme l'hydrogène ou l'hélium. L'hélium est une ressource présente naturellement et indispensable à de nombreuses applications telles que la détection de fuites, l'imagerie médicale, la chromatographie et l'électronique. Pour améliorer la prospection de cette ressource stratégique, l'intégration à grande échelle de capteurs d'hélium dans les sites géologiques présente un réel intérêt. Elle sous-entend le recours à un nombre de points de mesure important, une grande facilité d'intégration et un faible coût. Pour ces raisons, les capteurs électroniques miniaturisés sont en mesure de déclencher une rupture technologique.

Le but de ce post-doc est de montrer la faisabilité technologique d'un système de détection de gaz pour des applications géologiques pour l'hélium principalement, mais aussi pour CO₂, CH₄ et H₂ en utilisant la plateforme

de capteurs HEMTs développée à l'Institut Lafayette. Après la revue des éléments bibliographiques, il est apparu que le pentoxyde de vanadium se présente en candidat idéal pour ce type d'applications vues ses excellentes propriétés de détection des gaz, en particulier pour l'hélium, et vue la possibilité de le déposer en couches minces en utilisant les techniques de fabrication conventionnelles en microélectronique.

Une première étude s'est portée sur le processus de fabrication de couches sensibles à base d'oxydes métalliques en utilisant le dépôt physique à phase vapeur par pulvérisation cathodique ou sputtering. Les tests ont été réalisés pour la détection de l'hydrogène en utilisant les oxydes métalliques tels que l'oxyde d'indium-étain et l'oxyde d'indium-zinc. L'objectif initial est de me familiariser avec les techniques de fabrication et de caractérisation sous-gaz de capteurs à base de transistors

HEMT. Ainsi, pour le volet des travaux en science des matériaux, l'étude porte sur l'influence des paramètres de dépôt physique en phase vapeur par pulvérisation cathodique sur la structure chimique et la morphologie des matériaux sensibles. Pour le domaine de l'électronique et de la microélectronique, les travaux consistent à régler les paramètres de la lithographie pour le dépôt de couches sensibles en tant que grille d'un transistor HEMT et par une formation à l'utilisation avancée du banc de test sous gaz de l'Institut Lafayette.



Post-doc - Impact des variations du niveau des nappes phréatiques liées au changement climatique sur la remobilisation des polluants organiques

Post-doc démarré en avril 2020
Co-financement **BRGM**

Encadrement
Pierre Faure LIEC
Fabrice Golfier GeoRessources



Amélie Cavelan

Je suis originaire d'une petite ville en région Centre-Val de Loire. Depuis l'obtention de mon baccalauréat, j'ai développé un grand intérêt pour les géosciences et plus particulièrement pour la géochimie organique. Je possède une licence en Sciences de la Terre, un master spécialisé dans l'hydrogéologie, la géomatique et la géochimie environnementale (2016, Université d'Orléans), puis j'ai effectué une thèse portée sur la caractérisation des roches mères pétrolières et de la matière organique sédimentaire (2019, ISTO, Orléans).

De par mes expériences, j'ai acquis de bonnes connaissances et un goût particulier pour l'étude des composés organiques dérivés du pétrole. Mes recherches se basent sur l'utilisation de données issues de diverses techniques, telles que des analyses géochimiques, des mesures de porosité, de la pétrographie ou encore l'utilisation de dispositifs expérimentaux mis en place en laboratoire.

Les hydrocarbures pétroliers représentent la plus importante source de contamination des sites et sols pollués (37,2 %). Ces contaminants de type LNAPL (Light Nonaqueous Phase Liquid) s'infiltrent au travers de la zone non saturée des sols, migrent jusqu'au toit de la nappe et s'accumulent au-dessus de celui-ci en formant une phase pure (en rouge sur la figure 1).

Dans le cas d'une nappe phréatique «stagnante», les études de volatilisation et de dissolution des polluants organiques de type LNAPL suggèrent que la volatilisation est limitée par une diffusion lente et une dispersion verticale négligeable dans la phase aqueuse (Fig.1i). En revanche, les battements de nappe génèrent un étalement et un mélange vertical du LNAPL au niveau de la frange capillaire des sols, augmentant les surfaces d'échange entre le LNAPL et les phases gazeuse/liquide et

favorisant le relargage des polluants (phases dissoutes et gazeuses) (Figure 1ii, iii). Ce mécanisme de relargage des polluants organiques est d'autant plus important que les variations du niveau piézométrique sont intenses. Or celles-ci devraient s'accroître dans les décennies à venir sous l'effet des modifications du comportement des nappes associées au changement climatique (diminution des précipitations et plus grande variabilité d'intensité) et d'une utilisation croissante des ressources en eaux souterraines.

L'objectif du post-doc

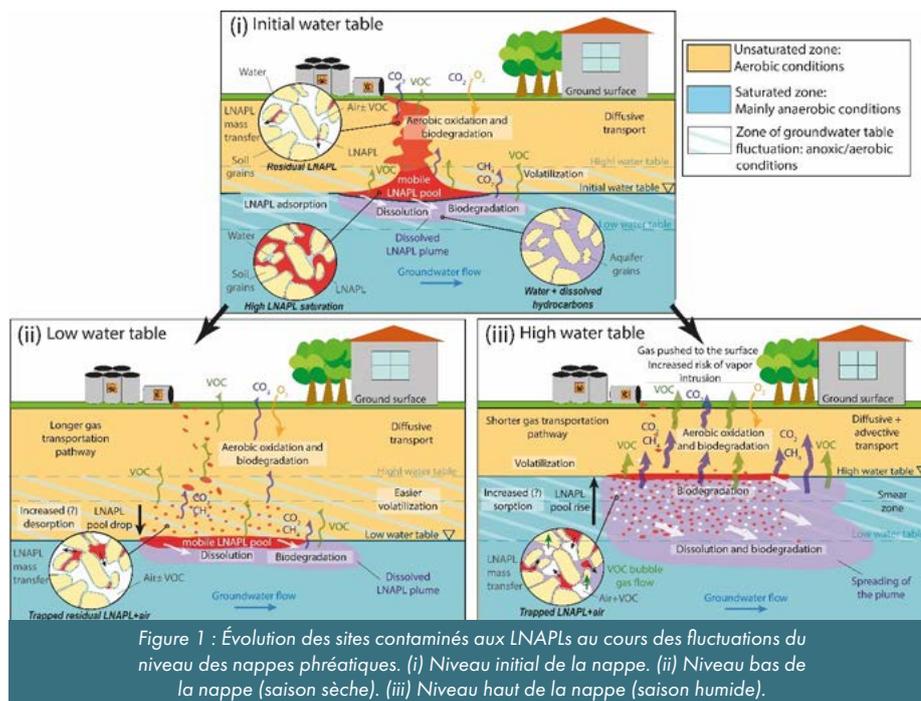
L'objectif global de ce projet de post-doc est (i) de mieux comprendre l'impact des variations de hauteur de la nappe sur les mécanismes de relargage de polluants organiques dans un contexte de changement climatique (événements extrêmes) et (ii) d'évaluer et de comparer la capacité de différentes méthodes de

suivi de la distribution de saturation du LNAPL dans les sols (mesures piézométriques, mesures géophysiques et issues de sondes installées in-situ). Ces expérimentations feront également l'objet de modélisations.

L'étude bibliographique

Ayant commencé en avril 2020, mon travail de Post-Doctorat s'est d'abord consacré à une vaste étude bibliographique devant permettre d'identifier les effets connus des variations du niveau piézométrique sur la mobilisation des LNAPLs mais aussi l'impact possible du changement climatique sur le cycle hydrogéologique et en particulier le niveau des nappes phréatiques. Ce travail a notamment révélé que les variations du niveau piézométrique favorisent la volatilisation, le transport, la dissolution et la biodégradation des

Axe 3 : Interactions profond - surface



contaminants organiques, accentuant leur relargage dans l'atmosphère et les eaux mais aussi leur dégradation. Les modèles climatiques prédisent une augmentation de l'amplitude et de la fréquence des variations du niveau piézométrique. On peut donc s'attendre à un relargage encore plus important de ces contaminants vers les eaux souterraines et l'atmosphère dans les prochaines décennies, accentuant les risques pour la population. Un article de synthèse intitulé : « A review of the influence of water table fluctuations on LNAPL contaminations: implications in a context of climate change » est en cours de rédaction et devrait être soumis avant la fin de l'année. Les conclusions serviront de fil conducteur pour le reste du projet basé principalement sur des expériences en colonnes lysimétriques.

Dispositifs expérimentaux GISFI

Malgré plusieurs mois de retards en lien avec la crise sanitaire COVID, les dispositifs expérimentaux sur lesquels repose le projet ont été installés en septembre dernier sur la station du GISFI, à Homécourt. Deux colonnes lysimétriques de 2 m³ spécialement conçues pour contrôler des battements de nappe et permettant un suivi

géophysique indirect (conductivité électrique), physico-chimique in situ (pH, Eh, température) et géochimique ont été remplies d'un sol modèle et seront artificiellement contaminées par du LNAPL début 2021.

Ce dispositif permettra de suivre la quantité et la nature des rejets (gaz dissous, phase pure) issus du LNAPL suivant deux scénarios de fluctuations du niveau piézométrique : un scénario 'normal' basé sur les chroniques climatiques régionales et un scénario basé sur les prévisions les plus extrêmes du GIEC. Ces scénarios, en cours de finalisation, seront préalablement testés sans contamination sur les dispositifs dans les deux prochains mois. Actuellement, des tests sont en cours pour vérifier le bon fonctionnement du dispositif. La calibration au laboratoire des sondes (géophysiques et tensiomètres) en fonction de la saturation respective en eau, LNAPL et air sera ensuite réalisée ainsi que la détermination des protocoles d'analyse des échantillons d'eau et de gaz. Ces étapes préliminaires indispensables ont pour objectifs de permettre le lancement de la phase de contamination et de monitoring des colonnes lysimétriques début 2021.



Colonnes lysimétriques récemment installées sur la station expérimentale du GISFI

Stage - Impact des fluctuations du niveau d'une nappe phréatique induites par les changements climatiques sur la remobilisation des hydrocarbures pétroliers (LNAPL)

Stage de M2 démarrant en janvier 2021

Encadrement
Amélie Cavelan LIEC

Contexte

Les LNAPLs sont une source importante de contamination des sols. Lorsqu'ils migrent dans la zone non saturée suite à un rejet accidentel, une partie des LNAPLs reste adsorbée ou piégée dans la zone non saturée par capillarité. Les plus volatils sont directement transférés vers la phase gazeuse du sol, et sont parfois à l'origine d'émissions en surface. D'autres, accumulés au toit de la nappe, génèrent sur le long terme un panache de LNAPLs dissous. Les variations saisonnières du niveau piézométrique entraînent une dispersion verticale importante de ces contaminants au niveau de la frange capillaire, favorisant leur propagation dans l'eau et l'atmosphère. Or, l'augmentation de la vitesse et de l'amplitude de ces variations piézométriques attendue d'ici 2100 en raison du changement climatique pourrait fortement impacter la remobilisation des LNAPLs et leur relargage dans l'environnement.

Afin de mieux comprendre l'impact des variations piézométriques sur les mécanismes de remobilisation des hydrocarbures, un dispositif expérimental couplant des mesures géophysiques indirectes (conductivité électrique), physico-chimiques in situ (pH, Eh, température) et géochimiques dans deux colonnes lysimétriques de 2 m³ a été installée par notre équipe sur la station du GISFI à Homécourt. Son objectif est d'évaluer et de comparer la

nature et la quantité des rejets de LNAPL d'un sol artificiellement contaminé au cours de deux scénarios de fluctuations du niveau piézométrique : un scénario 'normal' basé sur les chroniques climatiques régionales, un scénario basé sur les prévisions les plus extrêmes du GIEC.

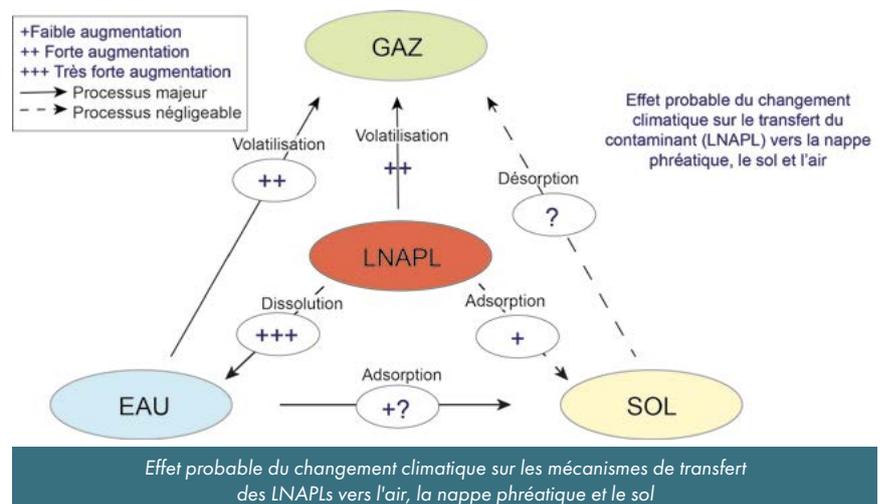
Sujet du stage

Dans ce contexte, notre équipe propose un stage de Master 2 dont l'objectif sera de mieux comprendre les modalités de transfert et de relargage des LNAPLs dans le sol, l'eau et l'atmosphère en fonction des fluctuations du niveau piézométrique. Selon le profil et les compétences de l'étudiant, les travaux du stagiaire pourront porter sur :

- La caractérisation géochimique en laboratoire d'échantillons prélevés in situ dans le dispositif expérimental.

Il s'agira d'identifier et de quantifier au fil des fluctuations du niveau piézométrique les composés organiques présents dans la phase pure de LNAPL, la phase dissoute et la phase gazeuse.

- La modélisation numérique du transfert du contaminant dans la zone saturée et non saturées et de son relargage vers la nappe et l'atmosphère. Il s'agit d'identifier les processus clés impactant le transfert et la remobilisation du LNAPL. L'étudiant devra se baser sur les données issues des sondes géophysiques et physico-chimiques pour modéliser les processus au sein des dispositifs expérimentaux.
- Le calibrage des tensiomètres et des sondes TDR en fonction des saturations en eau/LNAPL variables...



Post-doc - Comportement hydro-mécanique des failles dans le contexte du stockage géologique du CO₂

Post-doc démarré en mai 2020

Encadrement
Luc Scholtès GeoRessources

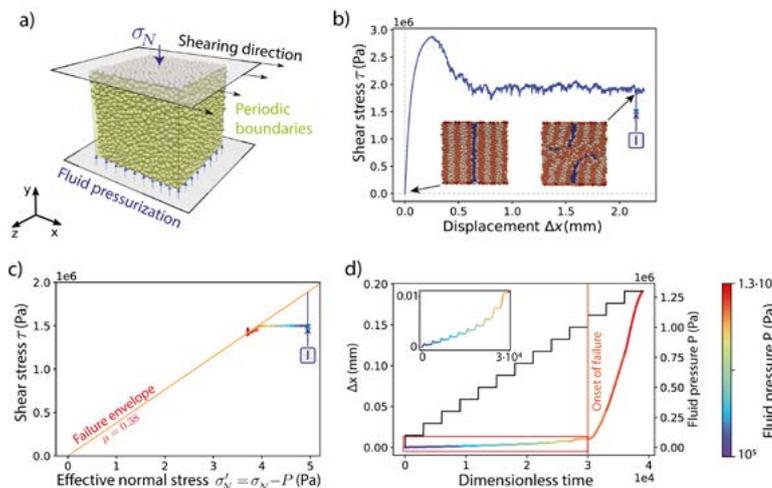
Hien Nguyen

“ Having a Bachelor's degree of Structural Engineer, I'm equipped with profound civil engineering knowledge on structure analysis and construction project management. After graduating as a structural engineer, I have finished my Master of Science at INSA Lyon, where I have learned the technique of Finite Element Method modelling of reinforced concrete structures, using ABAQUS to study dynamic problems and the behaviour of composite materials. Following the Master's degree was the PhD of soil mechanics, a collaboration between INSA Lyon and IRSTEA Grenoble, which provided me the experience of numerical modelling and instability analysis of granular materials using Discrete Element Method. I have worked for two years at LaSIE as a Post-doc researcher to strengthen my skills in numerical modelling and experimental works, as well as teaching experience. During this period, I work on the capillarity in unsaturated soil. I also participated in two micro-gravity flights ZeroG as a part of this research projects. ”



Context

The project investigates the hydro-mechanical behavior of sub-critically stressed faults. It focuses on the mechanisms leading a fault to reactivate due to fluid circulation.



Summary of numerical simulation procedure. (a) Snapshot of the fault model. (b) Direct shear test to localize shear within the sample, as expected in a stressed fault zone. (c) Fluid induced reactivation as expected in the Mohr plane. (d) Observation of a surge of shear displacement when the fault reactivation occurs due to fluid over-pressurization.

Activity

The project started the 1st May 2020. The first two months were dedicated to a literature review. Then, investigations have been done using the discrete element method (DEM) to build a numerical experiment representative of existing laboratory and in-situ experiments (Cappa et al., 2019; Guglielmi et al., 2015; Scuderi et al., 2017). The numerical simulation aims to: (a) reproduce fluid induced fault reactivation; (b) analyse the micromechanisms at play within the fault analogue during reactivation (Figure 1). A publication on this theme is under preparation with intention to submit to an international journal before the end of 2020.

Perspective

By investigating the behaviour of subcritically stressed faults using DEM, the project aims to identify the mechanisms controlling fluid related instabilities in faults through sensitivity analyses and parametric studies considering different intrinsic properties (friction, cohesion, permeability), as well as different loading conditions (normal stress, sub-criticality, flow rate).

Post-doc - Modélisation structurale 3D et d'évolution thermique du bassin carbonifère-permien sarro-lorrain

Post-doc démarré en janvier 2021
Co-financement **BRGM**

Encadrement
Raymond Michels GeoRessources
Laurent Beccalotto BRGM



Romain Hemelsdaël

Je suis géologue des bassins sédimentaires et je m'intéresse aux interactions tectonique-sédimentation et à l'architecture des géoréservoirs en contexte de marges continentales avec une approche de terrain (rifts et marges passives principalement). Après une licence à l'université de Lille 1, et master en géologie pétrolière à l'Université de Lorraine, j'ai obtenu mon doctorat à l'université de Lorraine (CRPG) en 2016. Mes chantiers de Recherche sont notamment localisés dans le rift de Corinthe en Grèce et la marge proximale du Golfe du Lion en France.

Le bassin sédimentaire Carbonifère-Permien Sarro-lorrain se trouve sous les formations mésozoïques de l'est du bassin de Paris. Malgré ses dimensions conséquentes, son contexte tectono-sédimentaire reste largement méconnu. Il a fait l'objet d'une exploration et d'une exploitation intense dans sa partie la plus orientale mais toutefois circonscrite jusqu'à la fermeture des activités des Houillères du Bassin de Lorraine. La lithostratigraphie du reste du bassin est connue par quelques sondages épars.

L'extension latérale et verticale du bassin est connue grâce aux investigations géophysiques. Un certain nombre de profils sismiques ont permis de cerner sa structuration en grand. De nombreux profils sismiques d'exploration pétrolière, confidentiels, ont été acquis sur l'ensemble du bassin au fil des décennies, mais pas nécessairement dans le but de s'intéresser en détail au Carbonifère. La conséquence est que le bassin n'est que partiellement reconnu et qu'aucune synthèse géologique n'a jusqu'à aujourd'hui été réalisée à

l'échelle de l'ensemble du Carbonifère et Permien lorrain.

Une étude approfondie de la structuration et de l'évolution d'un tel bassin est toutefois nécessaire. Elle permettrait :

- de cerner le fonctionnement de ce bassin situé au cœur de la chaîne varisque dans une position clef entre les domaines Saxothuringien et Rhéno-Hercynien, à l'aplomb de la suture rhéno-hercynienne;
- de proposer un contexte dynamique à l'histoire du remplissage sédimentaire afin de mieux comprendre l'organisation des dépôts, aujourd'hui perçue comme complexe car mal comprise dans ses relations à la tectonique;
- d'apporter un contexte permettant l'exploration géologique profonde pour des ressources telles que le gaz de charbon, la géothermie, la disponibilité de réservoirs pour le stockage d'énergie ou de gaz à effet de serre.

Objectifs et verrous scientifiques

L'objectif scientifique est de construire un modèle 3D dynamique de l'ensemble du bassin Houiller Lorrain.

1. La construction d'un modèle 3D implique que l'on s'intéresse à la géométrie des structures tectoniques et à leur cinématique. Les études passées ont proposé des fonctionnements cinématiques mais les modèles sont souvent conditionnés par une vision tronquée du bassin et limitée à deux dimensions.
2. La révision de l'évolution structurale du bassin s'accompagnera de l'étude du remplissage sédimentaire. En effet, la sédimentation est fortement tributaire de l'évolution cinématique à diverses échelles dans les bassins situés en cœur de chaîne de montagne. Les corrélations entre puits et la compréhension de l'architecture sédimentaire ont toujours posés problèmes dans

le bassin carbonifère lorrain par l'absence d'une vision synthétique. Le modèle 3D rendra compte des relations tectonique-sédimentation afin de progresser dans notre compréhension de l'architecture sédimentaire. Cette approche permettra également d'évaluer avec une plus grande précision l'épaisseur des terrains érodés lors des différents épisodes de surrection au sein du bassin, données préalables à une meilleure quantification de l'évolution thermique des dépôts au cours du temps.

3. L'analyse dynamique (spatio-temporelle) de l'évolution de la structure du bassin et de son remplissage conduira in fine à envisager la reconstruction des courbes d'enfouissement à partir d'une approche de modélisation de bassin (logiciel Petromod). Celle-ci fournira le cadre indispensable à la reconstruction de l'histoire thermique du bassin.

Stage - Interactions tectono-sédimentaires du bassin carbonifère-permien sarro-lorrain

Stage de M2 démarrant en janvier 2021

Encadrement

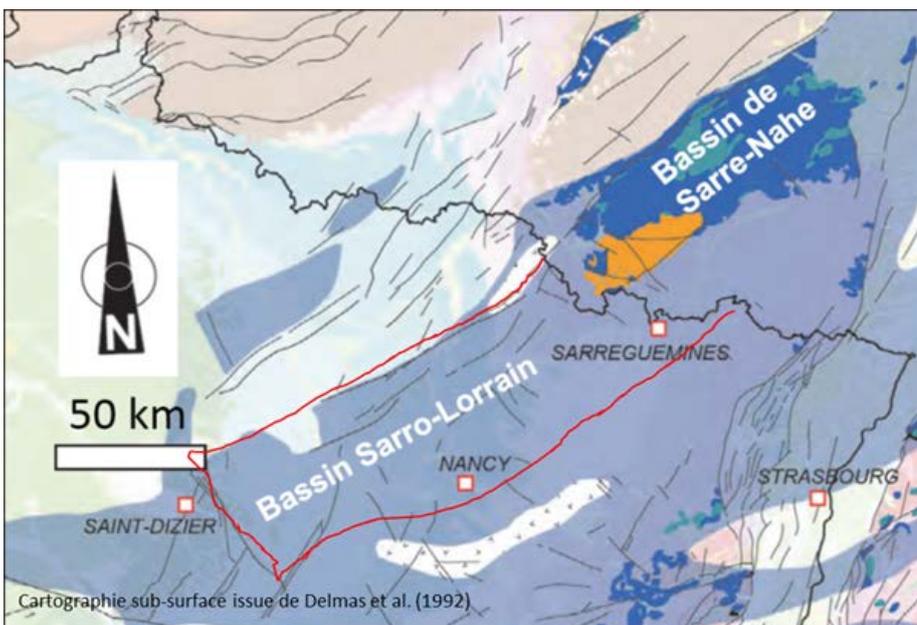
Romain HEMELSDAËL GeoRessources

Objectifs scientifiques du stage

- Construire des coupes de référence à travers le bassin à partir des interprétations sismiques et des conversions temps-profondeur.
- Établir un modèle de répartition des faciès, au sein des roches-mères et réservoirs à partir des interprétations sismiques et des corrélations de puits.
- A partir de coupes structurales de références, établir l'évolution thermique 2D du bassin.

Tâches à réaliser

Avant la construction d'un modèle géologique 3D, il est essentiel de synthétiser les données 1D et 2D et de proposer un modèle cinématique des interactions tectono-sédimentaires en 2D. Le stagiaire travaillera notamment sur plusieurs lignes de sismique réflexion, dont les interprétations sont débattues. L'exploitation des données de puits en lien avec les nouvelles interprétations sismiques (sous Kingdom) permettra d'établir des lois de vitesse pour convertir les profils de temps double en profondeur. En plus des corrélations stratigraphiques à partir des forages, les résultats seront aussi présentés sous forme de coupes structurales à travers le bassin qui serviront à réviser les modèles d'enfouissement dans différentes parties du bassin. Cela aura une incidence directe sur l'évolution thermique du bassin (sous Petromod 2D) qui sera modélisée pendant ce stage.



Projet exploratoire - Geochemical identity (gID) of raw materials and refined metals for enhancing traceability in the global supply chains: a case study of copper

Xuan Liu GeoRessources
 Jacques Pironon GeoRessources

Traceability refers to the ability to identify and trace the history, location, distribution and application of (metal) product, part and material in the supply chain. It ensures the reliability of sustainability claims of human rights, environment, labour and anti-corruption, which are closely related to the establishment of a sustainable and green future for humanity. Until recently, there exist only managerial approaches such as the OECD Due Diligence guidance and various sustainability schemes coupled with chain of custody. But these approaches rely heavily on the level of ambition and responsibility in sustainability of the stakeholders concerned, and therefore have very limited restricting power on low-responsibility companies. Moreover, these approaches may be plagued by false claims and may be vulnerable to mixing processes common to many raw materials and their refined counterparts.

To complement the existing traceability

system, we aim to find proper geochemical fingerprints in the raw materials and refined metals, which can serve as a permanent identities (ID) that carry geographic information throughout the supply chain (Fig. 1). Based on a comprehensive survey of geology and archaeology literatures, a case study of copper has been proposed to evaluate the practicality and feasibility of the concept. A combined methodology centering on Pb isotopic compositions will be assessed as such a fingerprint. At this stage, we have compiled Pb isotopic data on bulk rocks and minerals for global deposits, which suggest a promising though low resolution due to overlaps. This effect is expected to be counteracted with in-situ analyses on Cu mineral. Data in literatures cannot provide unambiguous evidence for Pb fractionation during modern Cu metallurgy. Accordingly, we have envisioned three work packages, i.e. deposit characterization, fractionation tests, and inverse mixing modelling.



Xuan Liu

The first package is to evaluate if Pb isotopes will suffice to differentiate Cu deposits geographically; the second is for understand and quantify the change of Pb isotopic compositions during the movement along supply chain; the third is to explore mathematics methods to derive source information.

In the forthcoming years, this technique will satisfy the needs of government, private sectors, NGOs and individual buyers who wish to obtain information about where and how the target metals were produced. Directly, it will promote metal producers to improve their environmental and social standards. It may emerge as a major means for detecting potential frauds. Overall, this technique aims to alleviate and ultimately eradicate environmentally - and socially - harmful metal productions, and will help to improve the level of sustainability of metal industry as well as human societies.

geochemical Identity (gID) system



Fig. 1 : A schematic diagram showing a typical supply chain of metal products, starting from mining through refining and manufacturing to end-users.

LA RECHERCHE

Axe 4 : incertitudes, évaluation des risques et intégration territoriale

- 4.1 Évaluation des risques accidentels et chroniques des nouvelles utilisations du sol et sous-sol
- 4.2 Analyse des trajectoires socio-économique et historique des territoires
- 4.3 Adapter le cadre réglementaire
- 4.4 Évaluation de l'intégration territoriale des projets

Axe 4 : Incertitudes, évaluation des risques et intégration territoriale

Doctorant	Sujet	Encadrants	Laboratoires	Date de début
Yann Beauloye	L'ancrage territorial d'un projet d'exploitation de gaz de charbon au sein d'un espace en mutation : l'ancien bassin houiller lorrain	Michel Deshaies Yann Gunzburger	LOTERR GeoRessources	novembre 2016
Manuel Isnardon	Impact et intégration territoriale du projet de stockage Cigéo dans la région Grand Est	Michel Deshaies Mark Bailoni	LOTERR ANDRA	octobre 2018
Céline Kutlu	L'articulation juridique des ressources naturelles du sol et du sous-sol dans une perspective comparée : France - Allemagne	Jochen Sohnle	IRENEE	novembre 2019
Post-doctorant	Sujet	Encadrants	Laboratoires	Date de début
	Woodstock : reconstitution historique des stocks et flux de bois	Jean-Luc Dupouey Xavier Rochel	Silva LOTERR	février 2021
Stage	Intitulé du stage	Demandeur	Laboratoires	Date de début
	Comprendre le territoire autour du projet Cigéo afin d'en analyser les impacts socio-économiques potentiels	Manuel Isnardon	LOTERR	janvier 2021

Thèse - L'ancrage territorial d'un projet d'exploitation de gaz de charbon au sein d'un espace en mutation : l'ancien bassin houiller lorrain

Thèse démarrée en novembre 2016 et soutenue le 4 décembre 2020

Encadrement

Michel Deshaies LOTERR

Yann Gunzburger GeoRessources

Comment s'est passé la soutenance de ta thèse ?

Très bien, mes directeurs m'y ont bien préparé. Les échanges ont été très productifs et instructifs. Cependant, je suis un peu frustré d'avoir été contraint, en raison du contexte sanitaire, de recourir à la visioconférence. Il n'y a pas la chaleur des échanges et la possibilité d'avoir ses proches à ses côtés. Heureusement, grâce au matériel de l'école des mines, la soutenance a été diffusée en direct sur le site de l'Université ce qui a minimisé l'impression d'isolement.

Comment expliquer le changement d'angle d'approche de ton sujet, le passage de l'étude de l'acceptabilité sociale à l'ancrage territorial ?

Ce sont les résultats des premiers entretiens qui m'ont mis sur la voie. Nous nous demandions au départ dans quelle mesure l'histoire minière locale pouvait faciliter l'acceptabilité du projet. Ceci sous-entendait de commencer par identifier de potentiels points d'opposition. En menant mes entretiens il s'est avéré que plusieurs structures clefs n'avaient soit pas connaissance du projet, soit n'y accordaient pas d'intérêt. Or, l'entreprise présentait ce projet comme un potentiel levier de redynamisation locale. Une nouvelle question s'est donc posée : si les structures en charge de la définition des

stratégies locales de développement ne soutiennent pas le projet, ou pire, ne le connaissent pas, comment celui-ci pourrait-il réellement apporter une plus-value locale? Après discussion avec mes directeurs de thèse, nous avons convenu que le sujet devait être réorienté dans cette direction. Nous avons l'impression que l'acceptabilité sociale, un sujet déjà très étudié, n'était pas l'enjeu principal de ce projet.

Quels sont les principaux résultats de tes travaux de thèse ?

Tout d'abord je pense que l'analyse de l'ancrage d'un projet par le prisme de sa compatibilité avec les documents de planification est assez innovant. Cette approche permet de toucher du doigt plusieurs disciplines (géographie, urbanisme, droit, économie). Les travaux ont mis en exergue l'importance pour les entreprises mais également les collectivités locales de travailler conjointement, ce qui dans les faits est rarement le cas.

Comment envisages-tu l'avenir du gaz de charbon en Moselle Est ?

Difficile de se positionner sur la concrétisation du projet, la demande de concession est toujours en cours d'instruction. Par contre, même si le projet est loin d'être dénué d'intérêt, je doute qu'en l'état il puisse occuper



Yann Beauloye

une place centrale dans l'avenir du développement local du fait justement de son manque d'ancrage.

Quelles sont tes perspectives d'avenir ?

Je suis un cas un peu particulier. Je possède un bureau d'études privé en urbanisme et en stratégie locale depuis 10 ans. Maintenant que ma thèse est terminée je vais en reprendre pleinement la direction. Je compte cependant valoriser mes travaux en développant de nouvelles prestations axées sur l'accompagnement à l'ancrage local des entreprises. Plusieurs structures m'ont déjà fait part de leur intérêt ce qui est encourageant. Je souhaite également continuer à garder un pied dans la recherche. Il me semble important de resserrer les liens entre le monde de la recherche et celui des praticiens. Les deux ont beaucoup à apprendre l'un de l'autre.

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

.....
Thèse démarrée en octobre 2018
Financement **ANDRA**

Encadrement
Michel Deshaies LOTERR
Marc Bailoni LOTERR
.....

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 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. L'un des sujets actuellement en discussion est celui de l'impact de ce projet sur ces territoires qui ont connu depuis plus d'un siècle un déclin démographique continu.

Depuis plus de 20 ans, l'installation du laboratoire a créé et continue de créer d'énormes attentes chez les élus du territoire. L'arrivée probable de 1000 à 2000 emplois pour la première phase de travaux et d'une éventuelle stabilisation autour de 600 emplois à partir de 2030, va-t-elle créer un nouveau dynamisme pour ce secteur en grande difficulté ?

La première question aborde la définition de l'échelle d'analyse. De quels territoires parle-t-on ? Quelles sont les zones géographiques qui vont bénéficier de retombées et dans quelles mesures ? Il existe une dynamique socio-démo-économique négative commune aux deux départements. Pour autant, des disparités apparaissent à plusieurs niveaux : limites administratives, opposition villes/campagnes, nord/sud, etc. Comment cette hétérogénéité va influencer l'intégration de Cigéo sur le territoire ? Comment peut-on anticiper l'impact d'un tel projet et à quelles échelles géographiques ?

Méthode

Nous devons comprendre le fonctionnement du grand territoire autour de l'actuel laboratoire de Bure-Saudron. Quelles évolutions démographiques ? Comment se déplace-t-on sur le territoire ? Où va-t-on travailler ? Quels sont ses atouts ? Ses faiblesses ? Quel est le profil des habitants ? Quelles sont les dynamiques internes et externes ?

D'autres facteurs vont venir impacter le territoire : outre les emplois directs, combien d'emplois indirects et induits vont être créés ? Quel type d'emplois (ouvrier, mineur, cadre, maintenance, etc.) ? Ce sont de véritables enjeux pour anticiper l'impact du projet.



Manuel Isnardon

Les territoires ont bénéficié de différents accompagnements financiers depuis le début des années 2000. Il sera important de comprendre leur fonctionnement et les résultats qu'ils ont pu obtenir.

Enfin, le Projet de Développement du Territoire pour l'accompagnement de Cigéo signé en octobre 2019 prévoit notamment l'aménagement de grands projets structurants pour ces prochaines années qui peuvent eux-aussi avoir un rôle dans l'évolution future du territoire.

Travail réalisé

La compréhension des dynamiques du territoire

Nos travaux ont insisté cette année sur la difficile définition de la notion de territoire. Les géographes peuvent approcher un territoire de 3 points de vue différents : existentiel, physique et organisationnel.

Cette série de carte présente quelques-unes des limites de territoire autour du projet Cigéo :

Axe 4 : Incertitudes, évaluation des risques et intégration territoriale

Les communes de Bure-Saudron sont entourées de plusieurs strates de collectivités : 4 départements, 5 Communautés de Communes, 2 Communautés d'Agglomération et 2 Pôles d'Équilibre Territorial et Rural. Chacune de ces strates a ses propres dynamiques, ses propres gouvernances (Fig. 1).

Les différentes collectivités sont structurées par des documents de planification urbaine qui organisent l'aménagement du territoire à court-moyen et long terme. Nous avons analysé l'ensemble de ces documents pour comprendre les dynamiques qu'ils proposent. Les premières conclusions montrent peu de travail entre collectivités, chacune ayant tendance à travailler individuellement.

Les échelles d'analyses projetées

Nous avons sélectionné deux aires d'études qui vont permettre d'approfondir nos recherches quant aux impacts potentiels du projet sur ces territoires (Fig. 2).

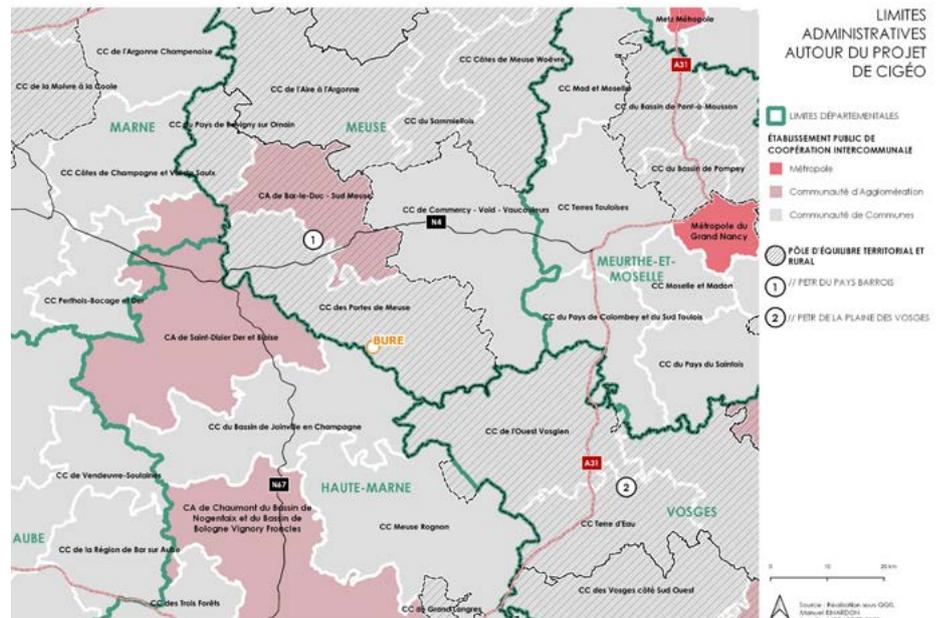


Figure 1 : Limites administratives autour du projet Cigéo, Isnardon, Morardet, 2020

La première couvre les communes situées à 20 kilomètres autour du projet Cigéo. Dans le cadre du laboratoire de recherche, un employé sur deux habite à moins de 20 kilomètres de son lieu de travail. Il s'agit donc d'une échelle cohérente pour fournir une analyse approfondie des impacts du projet Cigéo s'il venait à être réalisé. 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.

La seconde zone d'analyse représente les communes accessibles en 45 minutes en automobile. Elle englobe des communes qui proposent la gamme complète des services et commerces présents dans les villes moyennes. 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.

Nos travaux n'oublieront pas d'aborder 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, bien que plus éloignées de Cigéo.

Les rencontres avec les acteurs du territoire et les difficultés de 2020

La période du confinement a considérablement ralenti la progression de mes travaux. Je n'ai pas pu rencontrer d'élus et d'acteurs du territoire alors

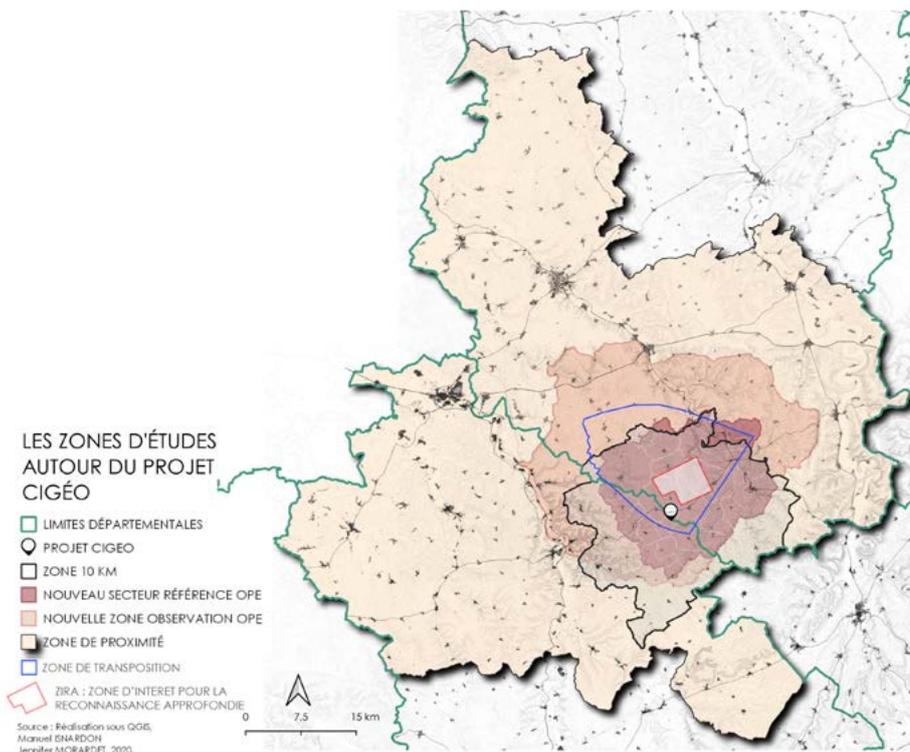


Figure 2 : Les zones d'études autour du projet Cigéo, Isnardon, Morardet, 2020

que j'avais prévu la seconde phase de mes rencontres. De plus, les élections retardées ne m'ont pas permis de me rattraper sur la période estivale.

Plus problématique, je base la rédaction de mon article scientifique sur l'analyse des résultats pour le territoire de l'accompagnement des GIP. Or, je devais rencontrer les deux directeurs afin de leur soumettre mon projet et leur demander de l'aide dans le traitement des données qui comportent des dizaines de milliers d'entrées. Malheureusement, pour le moment je n'ai pas réussi à reprendre contact avec eux, ce qui ralentit mes travaux.

Objectif de l'année 2021

Dès l'assouplissement des mesures sanitaires, je me rendrai à la rencontre des acteurs du territoire afin de rattraper les entretiens que je n'ai pu faire en 2020.

Ces difficultés sont compensées par un allongement de trois mois de mon financement et par l'aide d'un stagiaire qui m'accompagnera pendant quatre mois au premier semestre 2021.

L'année 2021 doit donc être l'année de ma rédaction de thèse, mais cela dépend largement du contexte sanitaire.

Stage - Comprendre le territoire autour du projet Cigéo afin d'en analyser les impacts socio-économiques potentiels

Stage de M1 démarrant en janvier 2021

Encadrement

Manuel Isnardon LOTERR

Contexte

Mes travaux portent sur l'analyse de l'impact et de l'ancrage territorial du projet Cigéo dans le Sud meusien et l'Est de la Haute Marne. Au cœur d'une région en déclin démographique et économique, ce projet industriel majeur peut-il influencer sur les dynamiques locales, et à quelles échelles ?

Après avoir analysé le fonctionnement de différents accompagnements financiers, le cœur du sujet va être de comprendre si ces accompagnements ont eu des résultats concrets pour le territoire.

A la suite de cette analyse, nous travaillerons sur les enjeux liés à l'arrivée d'un projet industriel de cette ampleur. Le territoire est-il prêt ? A-t-il tous les atouts pour utiliser Cigéo comme un levier de redynamisation ?

En complément du Projet de Territoire défini en 2019, nous réfléchirons aux enjeux liés à l'habitat, à l'offre de services, d'équipements, à la qualité de vie, aux paysages, ou encore à l'emploi, le tout dans un territoire en décroissance.

Objectifs du stage

Tout d'abord, Le stagiaire m'accompagnera dans le traitement des données des GIP 52 et 55 entre 2006 et aujourd'hui. Cela représente

un travail important et indispensable pour comprendre comment ont été réparties ces aides financières sur le territoire. Ces données seront traitées sous SIG, ce qui permettra au stagiaire l'approfondissement de sa maîtrise du logiciel. En parallèle, nous effectuerons une analyse approfondie des besoins du territoire, en nous basant sur la littérature scientifique, sur les documents de planification existants (PLUi, SCoT, SRADDET, etc.), sur la poursuite de nos rencontres avec les élus et acteurs du territoire, et sur un travail important de terrain.

Compétences développées

Ce stage permettra de développer des compétences de cartographie sous SIG, de travail en autonomie, de maîtrise des documents d'urbanisme et d'analyse des dynamiques d'un territoire. Le stage alternera entre phases de rédaction, et phases où l'aisance orale sera développée.

Le stagiaire proposé est actuellement en Master 1 de « géographie, aménagement, environnement et développement », et suit le parcours TRansition et AMénagement. Nous nous sommes rencontrés à cet objet, et il fait preuve d'une grande motivation pour ce stage, s'intégrant parfaitement dans son parcours et dans son projet professionnel.

Thèse - L'articulation juridique des ressources naturelles du sol et du sous-sol dans une perspective comparée : France - Allemagne

.....

Thèse démarrée en novembre 2019

Encadrement
Jochen Sohnle IRENEE

.....

Un vaste sujet : des ressources naturelles à la croisée de nombreuses réglementations

Ce sujet de thèse a été formulé de manière très vaste, ce qui permet une liberté dans l'appréhension et l'orientation à donner à ce travail de recherche. D'une part, il mobilise de multiples ressources naturelles (ressources renouvelables ou non : ressources minérales, ressources hydriques et forestières, sols, etc.), faisant l'objet de nombreux usages (énergétiques, industriels, agricoles et domestiques). D'autre part, il mobilise une diversité de droits (droit des ressources naturelles, droit de l'environnement, droit civil, droit minier, droit des énergies, droit de l'eau, etc.), et cela à plusieurs échelles : nationales (France et Allemagne), européenne, internationale.

L'accès à des événements pluridisciplinaires : se familiariser avec différents points de vue

Cette première année a ainsi été l'occasion pour moi de me familiariser avec les connaissances juridiques et techniques des diverses ressources naturelles du sol et du sous-sol et des enjeux qui y sont associés. J'ai pu me rendre à diverses conférences pluridisciplinaires en lien avec le sujet des ressources, à propos par exemple des métaux rares, de la transition énergétique en

Europe, des conséquences socio-environnementales de certains projets, de la fragilité de l'enquête publique et de la démocratie de proximité... D'autre part, j'ai eu l'opportunité de participer à une école d'été pluridisciplinaire sur les « Transitions énergétiques : innovations, gouvernances et sociétés » à Bordeaux.

Cette année a été marquée par mes premières interventions en conférence, où j'ai pu présenter par exemple « Le stockage géologique de CO₂ face aux contraintes réglementaires en France », lors du séminaire DEEPSURF le 15 octobre 2020, et « Les conflits socio-environnementaux face à l'extraction du lignite en Allemagne », lors des doctoriales transdisciplinaires sur les ressources naturelles le 13 novembre 2020.

Limiter le sujet : le choix de la ressource naturelle en eaux souterraines

En concertation avec mon directeur de thèse, j'ai finalement décidé de restreindre mon sujet à la ressource en eaux souterraines, considérée comme une ressource naturelle renouvelable, à condition de ne pas la surexploiter. En effet, ces eaux sont fortement sollicitées pour remplir des fonctions écologiques (permettent la vie des écosystèmes), des fonctions sociales (assurent l'essentiel des besoins en eau potable) et des fonctions économiques (besoins



Céline Kutlu

agricoles, industriels, énergétiques).

Pendant, l'ensemble des activités humaines risque de provoquer un mauvais état quantitatif et qualitatif (chimique) des eaux souterraines. Ces eaux doivent faire face à de nouveaux enjeux que sont les transitions énergétiques et le changement climatique.

Par conséquent, l'objectif principal de cette étude comparative est de venir apporter des connaissances sur les régimes juridiques français, allemands et européens, applicables à la gestion, la protection et la restauration des eaux souterraines. Ces normes doivent être en mesure de concilier des préoccupations socio-environnementales et économiques face aux usages concurrents sur une même ressource.

Les impacts quantitatifs et qualitatifs des eaux ne s'arrêtant pas aux frontières, il s'agira d'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) (Fig. 1). Il s'agira par

Axe 4 : Incertitudes, évaluation des risques et intégration territoriale

exemple de gérer conjointement les conséquences de l'ennoyage du point de vue hydrogéologique des anciennes mines du bassin houiller sarro-lorrain.

Ce travail nécessitera d'aller à la rencontre de multiples professionnels français et allemands compétents dans le domaine de l'eau, ce qui sera facilité par la mise en œuvre d'une cotutelle de thèse avec l'université allemande de Sarrebruck.

Le portrait de Céline Kutlu à lire dans Factuel : <http://factuel.univ-lorraine.fr/node/15780>

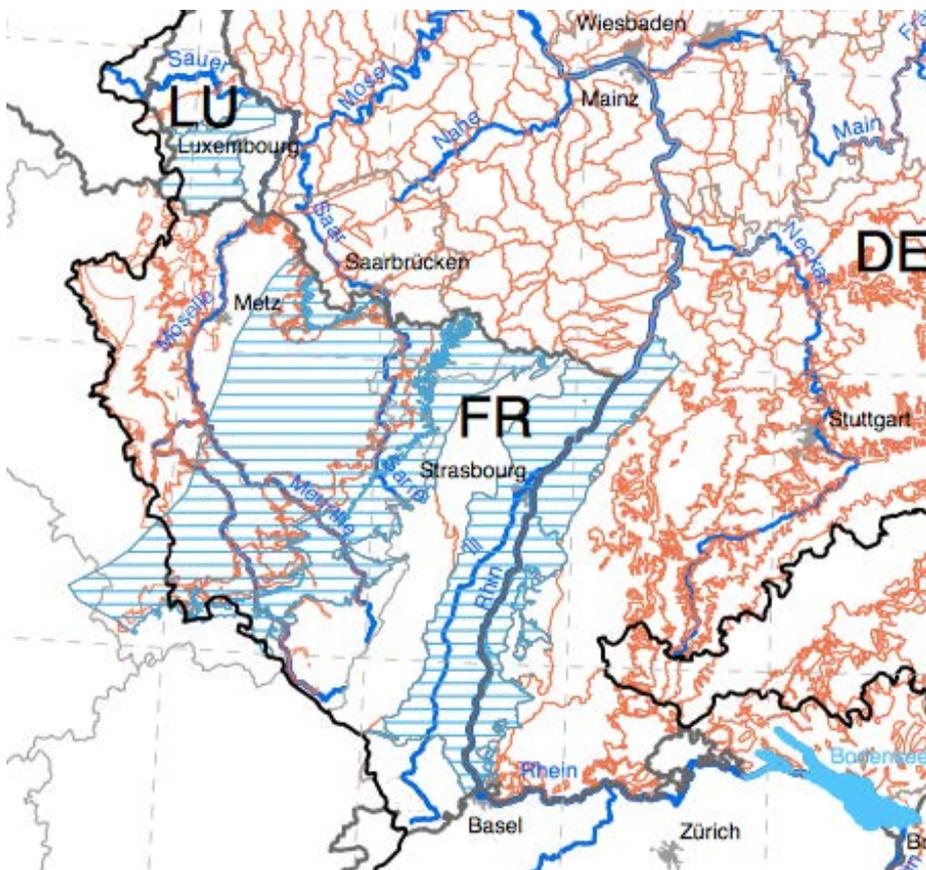
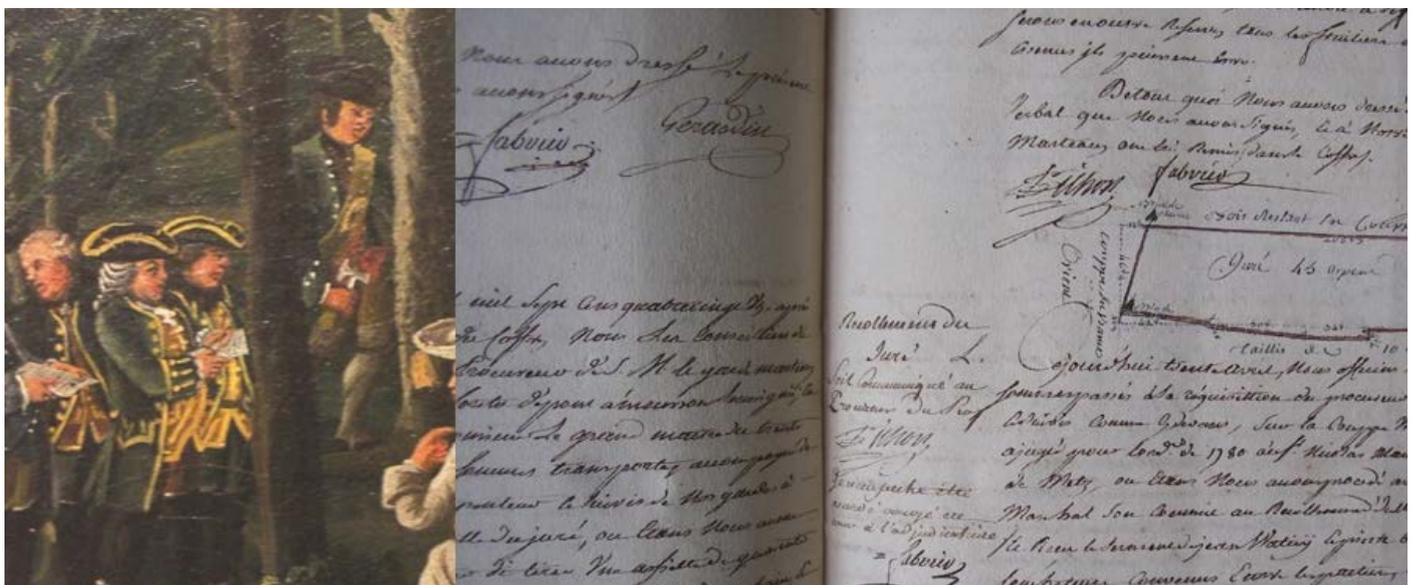


Fig. 1 : Zoom sur la zone transfrontalière du DHI Rhin : les masses d'eau souterraine (rouge) et les masses d'eau souterraine à coordonner à la frontière internationale (bleu) - (Bundesanstalt für Gewässerkunde)

Post-doc - Woodstock : Reconstruction historique des stocks et flux de bois

Post-doc démarrant en février 2021
Co-financement Région Grand Est

Encadrement
Jean-Luc Dupouey Silva
Xavier Rochel LOTERR



Extrait d'archives forestières.

Dans le contexte d'un épuisement progressif des ressources non renouvelables, une augmentation de l'utilisation du bois-énergie est prévue en France comme dans la plupart des pays disposant d'une ressource bois importante. Les impacts à court terme sur les écosystèmes forestiers de l'augmentation de ces prélèvements de biomasse ont été relativement bien étudiés, en particulier sur la biodiversité et la fertilité des sols. Par contre, les impacts à long terme et la façon dont les écosystèmes peuvent ou non effacer les traces de sur-exploitations anciennes, c'est-à-dire le degré de résilience de la forêt par rapport à cette perturbation, sont beaucoup moins connus.

Les forêts européennes ont connu une phase d'exploitation très intense du bois-énergie jusque dans la première moitié du XIXe siècle, puisque le bois était la principale source d'énergie pour la plupart des industries et les usages domestiques. Le passé pourrait ainsi fournir un analogue partiel du futur, qui permettrait d'étudier quel a été l'impact à long terme de la surexploitation, après plusieurs siècles d'exportations intenses, et plus d'un siècle après son arrêt. Mais la connaissance historique de ces prélèvements anciens, de leur niveau, de leur localisation, qui est nécessaire à ces études, est encore trop parcellaire.

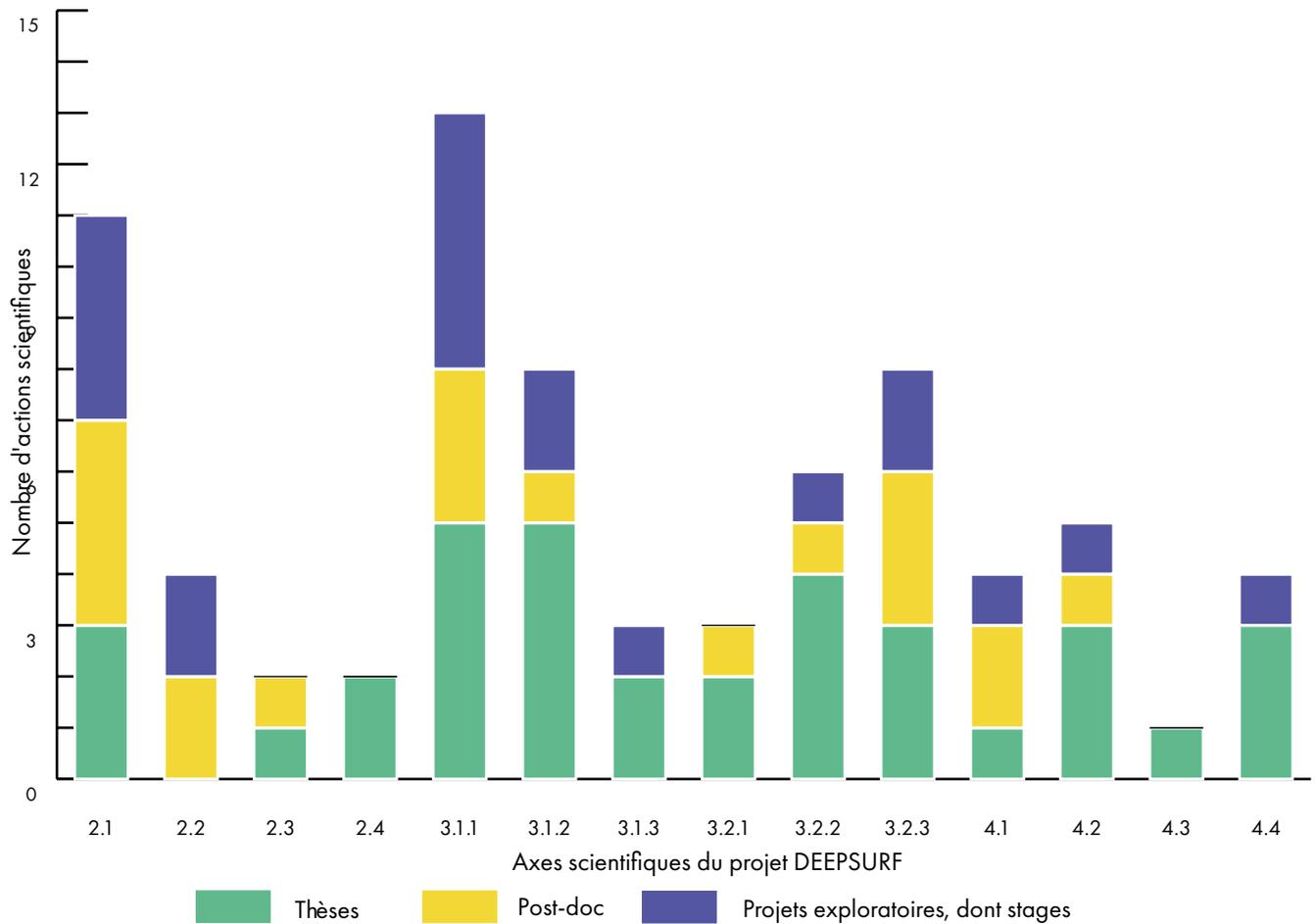
Objectifs du post-doc

1. Quantifier l'état des forêts lors du dernier minimum forestier dans le N-E de la France (stocks).
2. Quantifier les niveaux anciens de prélèvement de bois dans la région Grand-Est (flux) et comparaison avec les flux actuels ou anticipés.

Méthodes

1. Analyse d'archives historiques
2. Couplage avec des bases de données actuelles de minéromasse
3. Comparaison avec les données issues de l'inventaire forestier actuel

Répartition cumulée des actions scientifiques et de recherche par axe scientifique (WP)



FAITS MARQUANTS EN 2019

ÉVÉNEMENT

Séminaire DEEPSURF #1
« Capteurs et mesures de terrain »

AVRIL

RECRUTEMENT

Recrutement de la chargée
de communication

MARS

RECRUTEMENT

Recrutement du chef de projet

JANVIER

2019

ÉVÉNEMENT

Kick-off meeting et lancement
officiel du projet

RECHERCHE

Lancement de 3 thèses

NOVEMBRE

2018

RECHERCHE

Lancement de 2 thèses

JUIN

ÉVÉNEMENT

Workshop ECCSEL
« Underground laboratories for CO₂
geological storage research »

SEPTEMBRE

ÉVÉNEMENT

Brainstorming interne sur le site de
l'ANDRA à Bure

OCTOBRE

ÉVÉNEMENT

Séminaire DEEPSURF #2
« Les SHSJ et les nouveaux usages
du sol et du sous-sol dans la
transition énergétique »

RECHERCHE

Lancement de 9 thèses

2021

DÉCEMBRE

RECHERCHE

Soutenance de thèse de Yann Beauloye
« L'ancrage territorial d'un projet
d'exploitation de gaz de charbon au
sein d'un espace en mutation : l'ancien
bassin houiller lorrain »

RECHERCHE

Séminaire DEEPSURF #3
« Le stockage de carbone, une
solution pour la transition écologique
et énergétique ? »

OCTOBRE

RECHERCHE

Brunch « Sous-sol et transition
énergétique »

SEPTEMBRE

RECHERCHE

Inauguration du dispositif sécheresse
de l'INRAE en forêt de Montiers-sur-
Saulx

PROJET EXPLORATOIRE

Lancement projet exploratoire
« Traçabilité des métaux »

JUILLET

PROJET EXPLORATOIRE

Rapatriement et sauvetage des trois
carottes du Carbonifère lorrain

MARS

CRISE SANITAIRE

Crise sanitaire due au Covid-19 et
confinement

JANVIER

RECHERCHE

Lancement de 9 post-doc

2020

BRUNCH DEEPSURF

« Sous-sol et transition énergétique » - 1er octobre

Le 1^{er} octobre 2020, le projet DEEPSURF, en collaboration avec la direction des partenariats de l'Université de Lorraine (DEPAS), a organisé un e-Brunch avec pour thème « Le rôle du sous-sol dans la transition énergétique ». Ce dernier était animé par Tom Caquineau, chef de projet DEEPSURF.



Tom Caquineau a commencé par contextualiser cet e-Brunch en rappelant la définition de la transition énergétique. Comme son nom l'indique, il s'agit d'une transition, de modes de production d'énergies carbonées à partir de ressources fossiles, vers des modes de production d'énergie décarbonées à partir de ressources renouvelables. Dans ce cadre, le sous-sol peut être utilisé comme média de stockage souterrain ou comme source de chaleur non-intermittente, avec la géothermie. Ces aspects ont été au cœur des échanges du Brunch.

Philippe Gleser



La première intervention a été confiée à Philippe Gleser, maire de Lorry-lès-Metz et vice-président de Metz Métropole délégué à la transition écologique et aux paysages.

La transition énergétique est au cœur de la réflexion des politiques d'aménagement des territoires, à l'échelle des collectivités, comme Metz Métropole. Ces dernières s'appuient sur un certain nombre d'agence (qualité de l'air, d'énergie - climat...) et de schémas pour mettre en place des mesures en faveur de la transition énergétique. Metz Métropole a l'ambition de verdir son fonctionnement, notamment en utilisant massivement l'hydrogène dans le réseau de chaleur et pour la mobilité.

Jacques Pironon

Géologue, directeur de recherches au CNRS, fondateur du laboratoire GeoRessources de l'Université de Lorraine et du CNRS et spécialiste des fluides géologiques et des stockages souterrains, Jacques Pironon a coordonné plusieurs projets nationaux sur le stockage de CO₂ et pilote le programme DEEPSURF de Lorraine Université d'Excellence.

d'énergie par pompage (STEP) a été établie en 1933 au niveau des lac Blanc / lac Noir. Ce moyen de stockage d'énergie est le plus répandu à l'échelle mondiale (90% de l'énergie stockée). En cas de surplus d'énergie, de l'eau du lac du bas (lac noir, 935 m d'altitude) est pompée vers le lac du haut (lac Blanc, 1055 m).

- Le sel lorrain a été utilisé depuis plus de 3000 ans et la couche de

est également présent sur le site de Cerville, géré par Storengy.

- La France avait enclenché une transition énergétique dans les années 1970 en se dotant de capacités importantes de production d'électricité d'origine nucléaire. Les déchets radioactifs doivent être gérés de manière durable et sécurisée. L'option retenue est le stockage géologique de ces déchets. Le site identifié pour ce stockage est une couche d'argilite de 150 mètres d'épaisseur à 500 mètres sous la commune de Bure dans la Meuse. Ce projet, appelé Cigéo, est opéré par l'ANDRA.

- La carte de la figure 1 fait également apparaître les champs d'éoliennes de la région.

Les différents moyens de stockage de l'énergie intermittente (issue des éoliennes et panneaux photovoltaïques par exemple) ont été présentés (Fig. 2). En fonction des usages,

différentes méthodes peuvent être utilisées allant des supercondensateurs ou des batteries, qui permettent de rendre disponible de l'énergie rapidement (de l'ordre de la seconde à

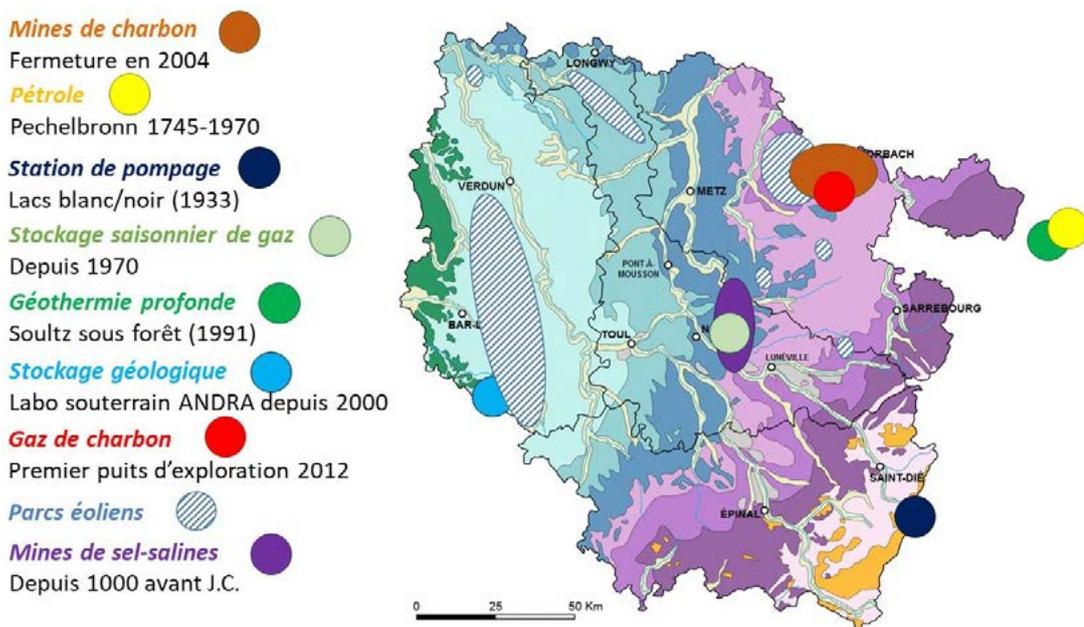


Figure 1 : Carte géologique de la Lorraine présentant ses ressources énergétiques historiques, actuelles et futures

Le Brunch a été l'occasion de présenter les avantages historiques de la région Grand Est, et plus précisément du territoire de l'ancienne région Lorraine, en termes d'utilisation du sous-sol pour des finalités énergétiques (Fig. 1) :

- Le charbon lorrain a été exploité de manière industrielle jusqu'en 2004 en Moselle-Est et un projet d'exploitation du gaz de charbon, principalement composé de méthane, est en cours d'étude.
- Du pétrole a historiquement été exploité en Alsace-Nord jusqu'en 1970, dans un bassin où une anomalie thermique permet désormais de disposer du premier pilote européen en géothermie haute température (HT).
- Dans le massif des Vosges, la première station de transfert

sel présente à l'Est de Nancy est exploitée actuellement par trois industriels (Salins, Novacarb et Solvay). Un stockage saisonnier de gaz naturel (méthane) en aquifère

Le stockage de l'énergie intermittente

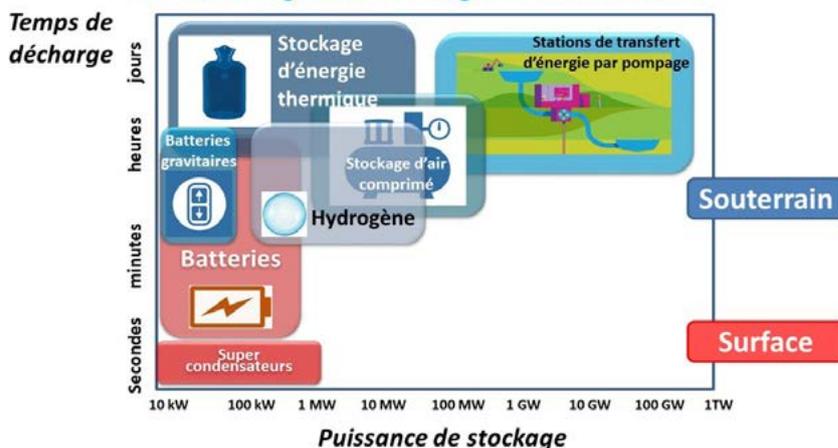


Figure 2 : Différentes méthodes de stockage d'énergie intermittente représentées sur un graphique du temps de décharge en fonction de la puissance de stockage

la minute) pour une relativement faible puissance, comparé aux STEP, déjà évoquées, qui permettent de générer des puissances importantes en des temps plus longs, allant de plusieurs heures à plusieurs jours.

Yvan Charnavel

Expert en cavités salines au sein de Storengy, filiale d'Engie, Yvan Charnavel s'occupe du design, des lessivages, des tests et des mises en service de cavités salines pour le stockage souterrain de gaz naturel. Il travaille aujourd'hui en vue du futur stockage d'hydrogène en cavités salines.



Il a abordé, dans le cadre du Brunch, les aspects techniques des stockages souterrains actuellement utilisés en France. Il y a trois grandes catégories de stockage de gaz naturel :

- Dans des gisements déplétés (épuisé) ou en aquifère,
- En cavités salines
- Cryogénique (en surface)

Les capacités de stockage de gaz naturel en France sont de 10 milliards de Nm³ (normaux m³, volume déterminé à des conditions de pression et température données). Le stockage souterrain a été illustré grâce à une maquette à l'échelle 1/1000 du site d'Étrez dans le département de l'Ain. Le type de stockage ici est une cavité saline de 300 000 m³. Il a fallu 4 ans pour la creuser.

M. Charnavel a attiré l'attention sur le fait que l'hydrogène, vecteur énergétique largement plébiscité par

les pouvoirs publics dans le cadre de la transition énergétique, n'est stockable convenablement qu'en cavités salines. Sachant que la France a mis 40 ans pour se doter des capacités actuelles de stockage de gaz naturel, créer des capacités conséquentes pour une économie hydrogène à l'horizon 2050 (soit dans 30 ans) doit être anticipé et devrait commencer dès maintenant.

L'hydrogène, vecteur qui semble central dans la transition énergétique, est pourtant produit de nombreuses manières, parfois loin d'être décarbonées.

- L'hydrogène « vert » est produit par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité « verte » issue d'énergie renouvelable, éolienne et/ou photovoltaïque.
- L'hydrogène « gris », très majoritairement utilisé actuellement dans divers procédés industriels, provient du vaporeformage du méthane ce qui libère du CO₂.
- Si, à la suite de ce procédé, le CO₂ est stocké ou utilisé (CCUS), il s'agit alors d'hydrogène « bleu ».
- Il existe également de l'hydrogène natif (hydrogène « blanc »), assez peu exploité jusqu'alors mais qui fait l'objet d'un intérêt grandissant de la part des industriels actuellement.

Stéphane Bertheaux Virgili

Chef de projet en charge de la coordination et de la formation des entreprises au pôle de compétences en travaux souterrains (PoCES) de l'École des Mines de Nancy.



Le Pôle de compétence en environnement souterrain est une entité de formation continue qui propose des mises en situation de travaux pour les grands travaux souterrains (tunnel Lyon - Turin ou transport urbain souterrain du Grand Paris) et l'exploitation minière. Il propose notamment des stages pratiques au laboratoire souterrain de l'ANDRA à Bure.





Le stockage de carbone, une solution pour la transition écologique ?

Séminaire DEEPSURF #3
Jeudi 15 octobre 2020

Amphithéâtre Parisot, Présidence Lionnois
18 rue Lionnois, Nancy

Email : deepsurf-contact@univ-lorraine.fr
Site : lue.univ-lorraine.fr/impact-deepsurf
Twitter : /IMPACT_DEEPSURF



IMPACT
DEEPSURF



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE





8h30 : Accueil

9h00 : Introduction de la journée par **Jacques Pironon, Christophe Schwartz et Serge Garcia**

Session 1 : Le sous-sol et le stockage de carbone

09h15 : **Jacques Pironon** (GeoRessources) « Le CCUS (Carbon capture, utilisation and storage): 30 années de R&D »

09h35 : Présentations flash

Sylvain Stéphant et al. (BRGM) « ECCSEL, the European research infrastructure dedicated to the capture, transport, storage and valorisation of the CO₂ (CCUS) »

Michel Deshaies (LOTERR) « Stocker le CO₂ pour maintenir l'acceptabilité de l'exploitation du lignite en Allemagne: chronique d'un échec »

Céline Kutlu (IRENEE) « Le stockage géologique de CO₂ face aux contraintes réglementaires en France »

10h00 : Questions et table ronde animées par **Philippe de Donato** (GeoRessources) « Le sous-sol et le stockage de carbone »

10h30 : Pause

Session 2 : Les sols et le stockage de carbone

10h45 : **Delphine Derrien** (BEF) et al. « Dynamique de renouvellement du carbone organique stocké dans les horizons profonds des sols »

11h05 : Présentations flash

Geoffroy Séré et al. (LSE) « Monitoring and modelling of carbon stocks in cultivated constructed technosols »

Victor Allory (LSE) et al. « Carbone organique dans les Technosols : quelles teneurs, quels facteurs d'influence et quels potentiels pour le stockage ? »

Christophe Schwartz (LSE) « Le sol urbain : le grand oublié du stockage de carbone ? »

Nicolas Bras et al. (Silva) « Les sols forestiers, puits de méthane »

11h30 : Questions et table ronde animées par **Christophe Schwartz** (LSE) « Les sols et le stockage de carbone »

12h00 : Déjeuner

Session 3 : La forêt et le stockage de carbone

13h30 : **Jean-Daniel Bontemps** (LIF) « Stock de carbone aérien des forêts européennes : dynamique récente, effets du développement économique, et compromis séquestration / substitution »

13h50 : Présentations flash

Clémentine Ols (LIF) « L'inventaire forestier national français, outil de monitoring des effets du changement climatique sur la séquestration de carbone dans les forêts françaises »

Baptiste Kerfriden et al. (LIF) « Estimation du puits du carbone forestier aérien des forêts françaises sur la période 2005-2018 »

Cédric Véga (LIF) et al. « Méthodes d'estimation sur petits domaines pour l'inventaire forestier national »

Jeanne Touche (BEF) et al. « Effet de sécheresse d'intensité variable sur la production de biomasse et le stockage du carbone au sein d'une forêt de hêtres »

Miguel Rivière (BETA) « Implications for forest landscapes of managing forests for in-situ carbon sequestration »

14h20 : Questions et table ronde animées par **Laurent Saint-André** (BEF) « La forêt et le stockage de carbone »

14h50 : **Florence Delprat-Jannaud** (IFPEN, présidente du CS de DEEPSURF) : présentation du projet transverse de l'ANCRE « Puits de carbone »

15h20 : Table ronde finale transversale entre les sessions, animée par **Florence Delprat-Jannaud** et avec les animateurs des trois sessions : **Philippe de Donato, Christophe Schwartz et Laurent Saint-André.**

15h50 : Fin du séminaire

Introduction au séminaire

La journée a commencé par une présentation du projet DEEPSURF par Jacques Pironon, puis du déroulé de la journée par les organisateurs scientifiques du séminaire: Christophe Schwartz et Serge Garcia.

Le séminaire sur le stockage de carbone est organisé en trois sessions : sous-sol, sols, forêt. Chacune des sessions se termine par une table ronde thématique animée par des spécialistes du domaine. Le séminaire finit par une présentation du projet « Puits de carbone » de l'ANCRE par Florence Delprat-Jannaud, co-animatrice de ce projet, puis par une table ronde finale transversale sur le stockage du carbone afin de faire des ponts entre les disciplines concernées lors des trois sessions.

Chaque session est introduite par une keynote de 20 minutes, suivie d'interventions courtes de 6 minutes. Les questions aux orateurs sont réservées aux tables rondes. Une particularité de la journée était la possibilité de suivre le séminaire à distance via Teams et de poser des questions écrites via la messagerie retransmise ensuite à la salle. A noter que trois intervenants ont présenté à distance.

Les intervenants :

- [Jacques Pironon](#), DR CNRS, fondateur du laboratoire GeoRessources, porteur du projet DEEPSURF, géologue spécialiste des fluides géologiques et des stockages souterrains
- [Christophe Schwartz](#), PR UL, directeur du LSE, spécialiste de pédologie urbaine
- [Serge Garcia](#), DR INRAE, directeur adjoint du BETA, économiste de l'environnement et des ressources naturelles
- [Sylvain Stéphant](#), ingénieur géochimiste au BRGM
- [Michel Deshaies](#), PR UL, LOTERR, géographe de l'énergie
- [Céline Kutlu](#), doctorante DEEPSURF, IRENEE, spécialiste de droit de l'environnement
- [Philippe de Donato](#), DR CNRS, GeoRessources, physico-chimiste spécialiste des transferts de gaz à travers la zone critique
- [Delphine Derrien](#), CR INRAE, BEF, spécialiste de la dynamique du carbone dans les sols forestiers
- [Geoffroy Séré](#), PR UL, LSE, spécialiste de génie pédologique
- [Victor Allory](#), ingénieur agronome, doctorant, LSE, spécialiste des sols très anthropisés
- [Nicolas Bras](#), ingénieur agronome, doctorant, Silva, méthane et sols forestiers
- [Jean-Daniel Bontemps](#), Ingénieur des ponts, des eaux et forêts (IPEF), directeur du LIF, spécialiste d'inventaire forestier national
- [Clémentine Ols](#), post-doctorante DEEPSURF, LIF, spécialiste des effets du changement climatique sur les ressources forestières
- [Baptiste Kerfriden](#), doctorant, LIF/BEF, écologie forestière
- [Ankit Sagar](#), doctorant DEEPSURF, LIF, télédétection appliquée à l'inventaire forestier
- [Jeanne Touche](#), doctorante DEEPSURF, BEF, biogéochimie forestière et changement climatique
- [Miguel Rivière](#), IPEF, doctorant, BETA, économie forestière
- [Laurent Saint-André](#), DR INRAE, BEF, spécialiste de cycles biogéochimiques en forêt
- [Florence Delprat Jannaud](#), Ingénieur de recherche IFP Énergies nouvelles, responsable de programme de R&D sur le CCUS, présidente du CS de DEEPSURF



Le sous-sol et le stockage de carbone

Le CCUS : 30 années de R&D

Jacques Pironon GeoRessources

Jacques Pironon a présenté un historique de la R&D sur le captage et le stockage de CO₂ (Carbon capture, utilisation and storage, CCUS). Le CCUS consiste à capter le CO₂ émis par une activité humaine avant son passage dans l'atmosphère. Il s'agit d'un des moyens envisagés pour faire face au changement climatique (CC) en évitant les émissions dans l'atmosphère de gaz à effet de serre (GES). Le CO₂ capté pourrait alors être stocké de manière pérenne (après transport) dans des compartiments géologiques profonds (réservoirs d'hydrocarbures déplétés, aquifères, veines de charbon inexploitées, etc.). Le CCUS devait contribuer à la réduction d'émission de GES en 2005 à hauteur de 20 % (d'après un scénario de l'Agence Internationale de l'Énergie, IEA).

Les premiers projets de recherche en Europe ont démarré dans les années 1990, avec notamment la première opération industrielle de stockage de CO₂ à Sleipner en Norvège (en 1996). Un certain nombre de directives et d'appels à projets européens ont été déployés en 2009 - 2010. D'après une publication d'Isabelle Czernichowski-Lauriol du BRGM en 2013, le déploiement industriel devait avoir lieu à partir de 2020. Cependant, ça n'a pas été fait le cas. Ceci s'explique en grande partie par le prix du CO₂ : le cours de la tonne de CO₂ s'est élevée jusqu'à 25 € en 2010 et a chuté à moins de 5 € dès 2011, diminuant de fait les investissements. Une recherche à bas bruit s'est poursuivie en Europe et en France, le GIS (groupement d'intérêt scientifique) Geodénergies a été créé en 2015. On a vu émerger alors des projets visant à créer

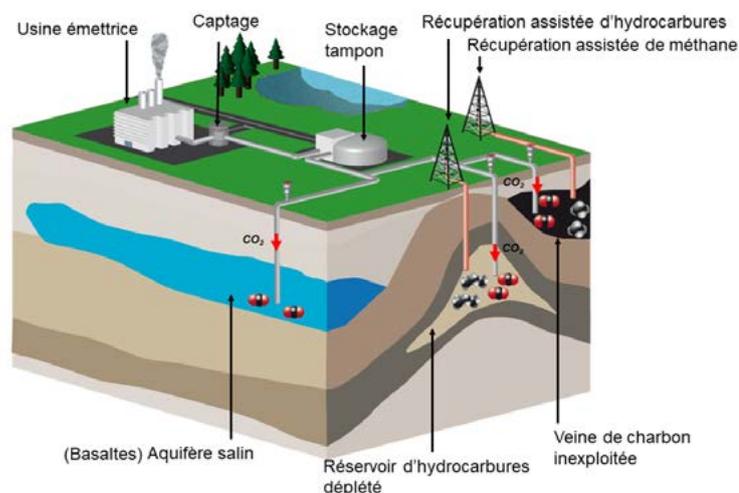
de la valeur ajoutée au CCUS comme le couplage à la géothermie ou la valorisation des eaux des aquifères retenus pour des opérations de stockage. Actuellement, les prix remontent et la tonne de CO₂ coûte environ 26 € en 2020.

En France, les programmes de recherche sur le CCUS sont apparus dès 2000. Un projet de pilote intégrant le captage, le transport et le stockage, porté par Total, a permis l'injection de CO₂ dans le gisement de gaz déplété de Rousse entre 2010 et 2013.

Les défis de la recherche scientifique sur le sujet du CCUS sont multiples et couvrent de nombreux champs disciplinaires : procédés, thermodynamique des fluides complexes, séparation, analyse du cycle de vie, monitoring, durabilité des matériaux, législation, acceptabilité, économie, impacts sur les territoires, etc.

Jacques Pironon a ensuite présenté succinctement quelques projets dont :

- Des projets d'Amphos 21 (partenaire de DEEPSURF) sur les processus de transport de gaz du sol aux infrastructures,
- Le projet CO₂ Dissolved, financé par le GIS Géodénergies et piloté par le BRGM (GeoRessources est partenaire), qui vise à coupler injection de CO₂ et géothermie,
- Un projet qui vise à coupler injection de CO₂ en aquifère et récupération de saumures potentiellement riches en métaux d'intérêt (Li, Mg, Fe, Pb...),
- Les projets qui visent à coupler production de bio-énergie (biogaz, biofuel) et stockage du CO₂ émis (BECCS),



Bloc diagramme explicatif du CCS, captage et stockage de CO₂

- Le projet Northern Lights (Norvège), actuellement le plus gros projet industriel de CCUS en Europe.

En Europe, le potentiel de stockage de CO₂ le plus important se trouve en Mer du Nord, du fait de la présence de nombreux réservoirs d'hydrocarbures déplétés (dont la pression fluide a chuté suite à l'exploitation des gaz et des hydrocarbures liquides).

ECCSEL, the European research infrastructure dedicated to the capture, transport, storage and valorisation of the CO₂

Sylvain Stéphant et al. BRGM

Sylvain Stéphant du BRGM a présenté par vidéo pré-enregistrée l'infrastructure de recherche européenne ECCSEL (European Carbon Dioxide Capture and Storage Laboratories). L'objectif d'une telle infrastructure de recherche est de favoriser les interactions entre chercheurs et industriels pour lever des verrous technologiques dans le domaine du CCUS. Les membres du consortium peuvent alors avoir accès à différentes plateformes expérimentales pour mener des projets de recherche. Les avantages pour les utilisateurs sont de partager l'expertise et d'avoir accès à une large gamme de plateformes, et pour les propriétaires de plateforme d'accroître la visibilité de la plateforme.

ECCSEL est organisée de manière nationale en Norvège, France, Royaume-Uni, Pays-Bas et Italie. Il y a actuellement 79 plateformes en Europe. En France, les acteurs du nœud français sont : l'ANDRA, l'INERIS, l'IFPEN, EDF, Total et le BRGM (coordonnateur).

Stocker le CO₂ pour maintenir l'acceptabilité de l'exploitation du lignite en Allemagne : chronique d'un échec

Michel Deshaies LOTERR

Après avoir présenté la part du lignite dans les sources d'électricité (24,6 % en 2011) et dans les émissions de GES en Allemagne (constante à environ 20 % entre 2008 et 2018, malgré une légère baisse des émissions au cours de cette période), Michel Deshaies a traité le cas de la centrale thermique de Schwarze Pumpe

dans le land de Brandebourg (à l'Est de l'Allemagne).

Cette dernière a été inaugurée en 1998 et un dispositif de captage du CO₂ émis, d'une capacité de traitement de 9 t CO₂ liquéfié/h, a été inauguré en 2008 par le ministre - président du land, Mathias Platzeck. Des sites expérimentaux de stockage du CO₂ se situent plus au nord dans le même land (à Ketzin, Neutrebbin et Beeskow). A partir de mars 2010, plusieurs manifestations ont eu lieu dans des villages riverains des sites d'enfouissement du CO₂. Le Bundesrat bloque la loi fédérale sur le CCS en septembre 2011, après que les premiers transports par camions du CO₂ capté ont eu lieu en mai 2011. En décembre de la même année, la société Vattenfall, propriétaire de la centrale thermique en question, abandonne un projet de construction du dispositif de captage de CO₂ similaire sur une autre centrale thermique de la région et en septembre 2014 le dispositif est démantelé à Schwarze Pumpe. L'abandon des projets de CCS n'est pas uniquement le fait de la non-acceptation sociétale, mais aussi le fait de la chute des prix du CO₂ en 2011 (comme présenté par Jacques Pironon précédemment).

En guise d'épilogue, l'association « Ende Gelände » est fondée en 2015 et lance des opérations d'occupation des mines de lignite. Vattenfall vend ses mines et centrales à la société tchèque EPH qui a l'intention de poursuivre leur exploitation. En 2019, la commission du charbon recommande la fermeture de toutes les centrales à charbon et au lignite pour 2038. En mai de la même année, Angela Merkel relance la question du CCS.

Le stockage géologique de CO₂ face aux contraintes réglementaires en France

Céline Kutlu IRENEE

Céline Kutlu a présenté les aspects réglementaires du CCS dans le droit français.

Le stockage géologique du CO₂ entre dans la loi française (loi Grenelle 2) en 2010, par transposition de la directive européenne de 2009 relative à la question. Le code minier français assimile alors les formations souterraines aptes au stockage de CO₂ à des mines. Les travaux de recherche de



formations souterraines sont donc encadrés par l'octroi d'un PER (permis exclusif de recherche). Ces formations souterraines doivent permettre d'assurer un confinement sûr et permanent du CO₂.

D'après le code de l'environnement français, le CO₂ n'est pas un déchet. Cependant, dans le droit international, le CO₂ est assimilé à un déchet, ce qui pose problème pour le stockage offshore. Les sites de stockage sont des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Table ronde et questions sur la session « Sous-sol et stockage de carbone »

La question de l'analyse du cycle de vie et de l'empreinte carbone du CCUS a été posée: est-ce que le CCUS n'émet pas plus de GES qu'il ne permet d'en stocker ?

Les aspects sociétaux sont à prendre en compte pour toute utilisation du sous-sol à des fins énergétiques (d'extraction de ressources ou de stockage dans le cadre de la transition énergétique).

Quels sont les potentiels de stockage réels ? Il y a une différence entre le potentiel de stockage et la réalité de terrain comme entre les « ressources » et les « réserves » pour les matières premières. Il faut tenir compte des données techniques existantes qualifiant le site, de puits « réutilisables », de la distance entre l'unité de captage et le site de stockage, des éventuelles co-valorisations, de la perception des populations et de la législation.

Les données économiques sont essentielles pour expliquer les difficultés de créer une filière CCS en Europe mais pas uniquement. Les aspects quota de CO₂ associés aux coûts de mise en œuvre et de surveillance à long terme d'une chaîne CCUS restent toujours des points bloquants pour un réel déploiement industriel. Il semble que seule une contrainte administrative forte pourrait pallier cet aspect. De plus, certains mouvements politiques et des associations ont agi pour empêcher ce déploiement considérant que le CCUS était une façon détournée de « subventionner » l'énergie fossile.

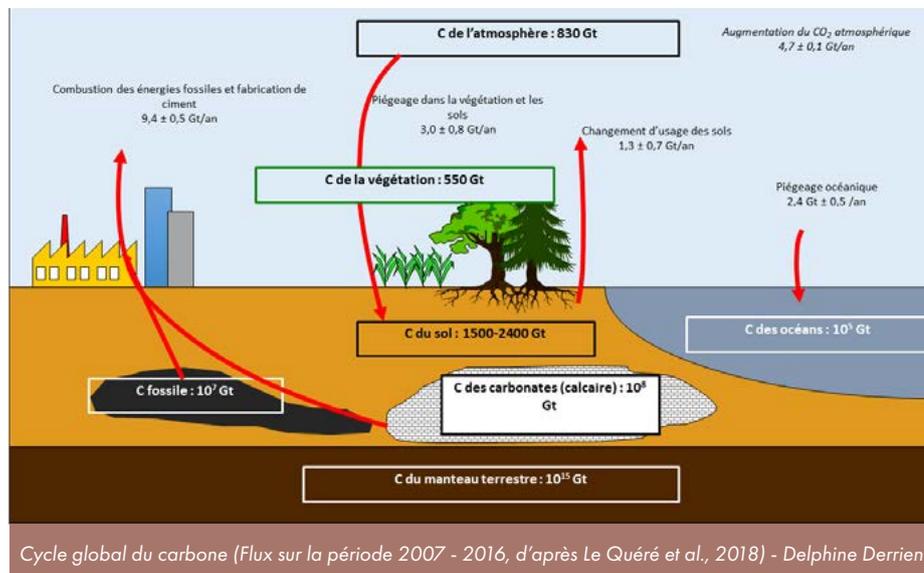




Les sols et le stockage de carbone

Dynamique de renouvellement du carbone organique stocké dans les horizons profonds des sols

Delphine Derrien BEF et al.



Delphine Derrien a commencé par rappeler le cycle global du carbone. Le piégeage par la végétation et les sols contribue à la séquestration d'environ 3 Gt de carbone/an tandis que les changements d'usages des sols (déforestation...) émettent environ 1,3 Gt C/an. Il y a donc un transfert net de l'atmosphère vers le sol de 1,7 Gt C/an. Afin de garantir la neutralité carbone à l'horizon 2050 en France, il va falloir absorber 80 Mt CO₂ éq. pour contrebalancer les émissions incompressibles (de même valeur). A titre de comparaison, les émissions en 2015 étaient de 458 Mt CO₂ éq et les objectifs pour 2030 sont fixés à environ 300 Mt CO₂ éq.

Le temps de résidence du carbone dans les horizons profonds (30 - 100 cm) du sol est peu connu, c'est d'ailleurs l'objet de cette présentation. La moitié du carbone des sols est situé dans ces horizons profonds. Le renouvellement du C profond est estimé par traçage isotopique (depuis les années 1980). Entre 1960 et 2010, 25 % du carbone a été renouvelé sur 1 mètre de profondeur. Seul 19 % du carbone renouvelé se situe dans les horizons profonds et 50 % dans les dix premiers centimètres. L'incorporation de carbone dans les couches profondes dépend plus de l'aridité que de la température. Il est aussi fonction de l'usage et du type de sol. Le carbone ancien augmente donc avec la profondeur (notamment du fait de la

diminution de l'activité des décomposeurs avec la profondeur).

L'âge moyen du carbone organique des sols est d'environ 7 ans à 0 centimètre, 200 ans à 30 centimètres et 1250 ans à 1 mètre. Le temps moyen de résidence

des horizons profonds est donc de 415 ans. Le carbone des sols est ancien, il résulte de la gestion passée des agro - et éco-systèmes. Pour augmenter le stock de carbone, il faudrait augmenter les apports dans les horizons profonds (via des plantes à enracinement profond par exemple).

Suivi et modélisation des stocks de carbone de Technosols construits

Geoffroy Séré LSE et al.

Geoffroy Séré a commencé sa présentation par le constat de l'anthropisation (croissante) des sols (friches industrielles,

déchets, etc). Une solution pour y remédier est d'utiliser des produits anthropiques pour construire des technosols. Cela s'inscrit dans le domaine du génie pédologique. Différents technosols ont été ainsi construits à la station expérimentale du GISFI à Homécourt (54) à partir de sous-produits papetiers et/ou de terre bio-remédiée. On constate que la productivité (agricole) du technosol augmente alors avec le temps. La vie s'y développe en parallèle (présence de lombrics). La dynamique du stock de carbone organique diminue dans un premier temps (du fait de la minéralisation), puis augmente grâce aux apports de carbone organique par la végétation. Ainsi, les stocks de carbone des technosols finissent par être supérieurs à ceux des sols naturels. Le potentiel de séquestration du carbone est dépendant des pratiques, ainsi que de la composition de ces technosols. En général, ils sont construits à partir de matériaux déjà riches en matière organique et sont enfouis en profondeur ce qui favorise la séquestration du carbone.

Carbone organique dans les Technosols : quelles teneurs, quels facteurs d'influence et quels potentiels pour le stockage?

Victor Allory LSE et al.

Victor Allory a présenté une méta-analyse du carbone dans les technosols à partir de données de 953 échantillons de sol provenant de 130 articles scientifiques. La teneur moyenne en carbone organique est élevée, avec une légère diminution en profondeur et une très forte variabilité. L'effet du type d'activité (urbain, industriel, minier) est significatif. En particulier, les sols industriels contiennent plus de carbone





organique que les deux autres. Le stock moyen de carbone dans les 30 premiers cm de 74 technosols, dont les données de carbone organique étaient disponibles, est de 73,2 t C/ha. Les technosols font partie des sols qui possèdent les plus grands stocks de carbone par unité de surface.

Le sol urbain : le grand oublié du stockage de carbone ?

Christophe Schwartz LSE et al.

Christophe Schwartz a présenté les résultats de travaux de thèse d'Aurélié Cambou. Fournir un hébergement et les infrastructures de soutien à un million de personnes nécessite 40 000 hectares de terres. L'urbanisation croissante à l'échelle mondiale nécessite de s'intéresser aux services écosystémiques (SE) rendus pour les sols urbains. En France, les stocks de carbone organique sont les plus élevés dans les sols forestiers et les sols urbains et industriels, avec une forte variabilité pour ces derniers. Les sols urbains représentent 3 % de la surface du globe. Pourtant, l'évaluation des stocks de carbone organique n'est que partielle. Des profils de sols d'espaces verts et imperméabilisés révèlent de fortes disparités. Il y a nécessité de changer d'échelle : vers le territoire urbain.

A l'échelle des métropoles, le stock moyen de carbone organique dans les parcs urbains parisiens est près de 2 fois supérieur à ceux des sols forestiers et agricoles de la région Île de France. A New-York, les stocks des parcs sont similaires à ceux des sols forestiers régionaux et presque trois fois supérieurs à ceux des sols agricoles régionaux. A l'échelle nationale, la contribution des sols urbains à la

séquestration de carbone organique est significative (7 %) malgré la faible surface.

Pour augmenter le stockage de carbone dans les sols urbains, cette étude émet les recommandations suivantes :

- Éviter l'imperméabilisation et inciter la dés-imperméabilisation
- Promouvoir la végétalisation
- Prioriser le recyclage du carbone organique des sols in situ
- Développer un cadre réglementaire pour protéger le carbone organique des sols des perturbations humaines

Les sols forestiers, puits de méthane

Nicolas Bras Silva et al.

Les sols terrestres représentent une part importante des puits de méthane globaux (i.e. environ 38 Tg/an). Parmi les sols, les sols forestiers sont les plus importants contributeurs. La production de méthane y est due à l'activité de micro-organismes méthanogènes, qui

produisent du méthane dans des conditions anaérobies. La consommation de méthane y est due à l'activité de micro-organismes méthanotrophes. Ce processus est influencé par de nombreux facteurs, dont la porosité en air et l'espèce d'arbre. Nicolas Bras montre que la consommation de méthane est plus importante dans des sols de hêtraies par rapport à ceux de pinèdes, chênaies et pessières.

Table ronde et questions sur la session « Sol et stockage de carbone »

L'attention a été attirée sur le fait que l'usage des terres (agricole vs. forestier) joue sur les stocks de carbone. En forêt, les stocks de carbone sont de 80 t C/ha, tandis que dans les sols agricoles ils sont d'environ 50 (et 35 pour les sols viticoles). Ces présentations ont montré l'importance des sols urbains dans la séquestration du carbone avec des stocks parfois aussi conséquents qu'en forêt. La dynamique des sols en ville est encore mal comprise.

Concernant les technosols qui semblent former un stock de carbone significatif, un bilan carbone sur l'ensemble du cycle de vie (avec l'acheminement des matériaux constitutifs) devrait être fait.



A scenic view of a forest with a river and a bridge. The river flows through the center of the frame, reflecting the surrounding greenery. A metal bridge is visible in the background, crossing the river. The trees are lush and green, indicating a healthy forest environment.

La forêt et le stockage de carbone

Puits de carbone aérien des forêts européennes

Jean-Daniel Bontemps LIF

Jean-Daniel Bontemps a focalisé sa présentation sur la dynamique récente, les effets du développement économique et le compromis séquestration/substitution.

Jean-Daniel Bontemps a d'abord présenté le rapportage européen sur l'état des forêts en Europe. Les stocks et surface de la forêt européenne suivent une tendance à l'augmentation depuis 1990. Cette tendance est unique au monde car, sur les autres continents, les deux paramètres diminuent. Entre 1990 et 2015, la forêt aérienne s'est imposée comme un puits de carbone généralisé, avec une augmentation de la surface dans de nombreux pays d'Europe (Pologne, France, Espagne, etc.). L'augmentation moyenne du stock de carbone (C) est de 420 hm³ / an, soit 120 Mt C (ce qui représente 8 % des émissions européennes). On constate l'extension des forêts après une longue période de réduction (transition forestière, qui coïncide avec la révolution industrielle où le bois a été moins utilisé au profit du charbon).

La surface de la forêt recommence nettement à augmenter à partir de 1920. Le taux de boisement est inversement corrélé avec la densité de population (coefficient de - 0,64), tandis que le stock de bois est corrélé avec la surface forestière (coefficient de + 0,65). Depuis l'émergence de l'agriculture, il y a environ 7000 ans, le carbone atmosphérique a cru de 20 ppm du fait de la déforestation (ce qui est bien inférieur à l'augmentation d'origine

anthropique depuis 1850, 280 à > 400ppm aujourd'hui). Il est à noter que le stock augmente plus vite que la surface, c'est-à-dire que la forêt se densifie en Europe. En France, le stock aérien a augmenté de + 60 % en 35 ans et le stock / ha de + 30 % en 35 ans (la densité du stock de C a augmenté de 120 à 160 m³/ha entre 1975 et 2010). Jean-Daniel Bontemps constate une déprédation historique du stock.

Il a ensuite exploré les relations entre puits de C et développement économique. Le taux de boisement est inversement corrélé avec la densité de population (coefficient de - 0,64), tandis que la densité de stock est corrélée à la densité de population (coefficient de + 0,53). La relation entre richesse (PIB/hab) et prélèvement de bois est positivement corrélée (coefficient de + 0,57). La part de forêt privée est corrélée à la richesse d'un pays (coefficient de + 0,80).

L'intervenant a ensuite abordé la gestion du puits de C. Selon certains auteurs, la forêt serait une solution marginale à l'atténuation du changement climatique (CC). Elle ne remplacerait pas la diminution des émissions de GES. Le compromis entre séquestration de C et substitution (biomasse énergétique) est largement débattu. La forêt européenne est sous-exploitée : la variation du stock de bois entre 2005 et 2015 est négativement corrélée avec l'accroissement des prélèvements (- 0,58). Jean-Daniel Bontemps note également une absence de liaison entre puits et capital.

En conclusion, la forêt européenne est un puits de carbone à préserver. Cependant, elle demeure sous-exploitée donc les

prélèvements peuvent s'accroître tout en maintenant le service écosystémique du puits de C. Une incertitude demeure quant à l'acquisition des ressources bois face au changement climatique.

Suivi des effets du changement climatique sur la séquestration de carbone dans les forêts françaises

Clémentine Ols LIF

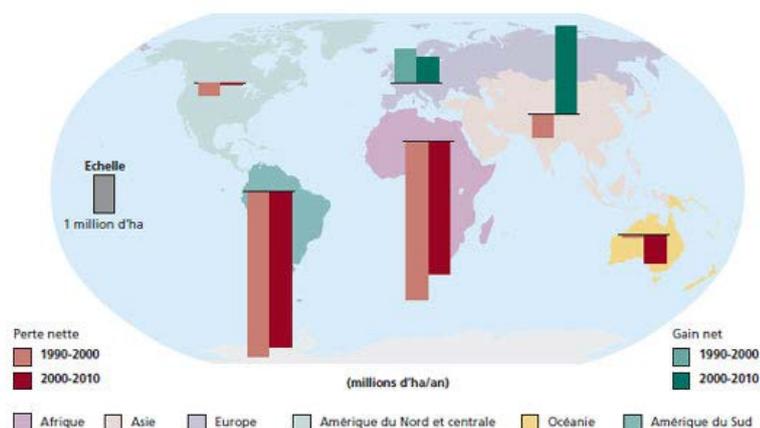
Clémentine Ols part du constat que la forêt française constitue un important puits de carbone avec quelques 70 Mt CO₂ stockés chaque année (ce qui représente 20 % des émissions annuelles). La réponse de la forêt au changement climatique est étudiée. Des dépérissements sont constatés.

L'inventaire forestier national (IFN) est un outil de monitoring important pour suivre les dynamiques de productivité forestière. Depuis 2005, l'ensemble du territoire est couvert chaque année avec une grille d'inventaire de 1 km x 1 km (plus de 5000 points d'inventaire). L'IFN donne lieu à une description exhaustive des peuplements. L'ensemble des facteurs locaux influençant la productivité sont mesurés et connus. Les effets du climat sur la croissance sont filtrés grâce à la modélisation. L'étude a porté sur 8 essences de conifères en peuplement purs et équiens sur 2006 - 2016.

Les effets du réchauffement (augmentation de la température) sont contrastés : les trajectoires de productivité négatives (perte de productivité due aux effets climatiques) correspondent aux régions qui se réchauffent le plus vite. Les contraintes hydriques augmentent, les trajectoires de productivité positives correspondent aux régions où les précipitations augmentent. Elle constate aussi des trajectoires de productivité positives dans les systèmes régionaux aux structures plus hétérogènes.

Elle a pour perspective d'étendre ces travaux aux essences feuillues.

FIGURE 4
Changement annuel de la superficie forestière par région, 1990-2010



Changement annuel de la superficie forestière par région, sur la période 1990 - 2010, d'après l'Organisation Mondiale pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) - Jean-Daniel Bontemps

Estimation du puits du carbone forestier aérien des forêts françaises sur la période 2005-2018

Baptiste Kerfriden INRAE et al.

Baptiste Kerfriden utilise la nouvelle base de données XyloDensMap (XDM) de densité du bois des espèces forestières pour estimer le stock de carbone forestier et son puits annuel sur la période 2005 - 2018. La méthode actuelle d'estimation du carbone aérien forestier en France est basée sur le dispositif de l'IFN suivant :

1. Volume de bois fort tige
2. Volume aérien total
3. Biomasse aérienne totale
4. Carbone aérien total

Le passage à la biomasse repose sur un échantillonnage faible et ancien. La nouvelle méthode explorée ici (XDM) consiste en une collecte adossée au plan de sondage de l'IFN : (1) extraction de carottes de bois à 1,30 mètres de hauteur, (2) mise en boîte, (3) passage au scanner à rayons X, (4) obtention de la densité grâce au logiciel CarDen, (5) mesure d'un profil de densité sur une carotte. 55 000 carottes sont disponibles pour la période 2016 - 2017 à l'échelle nationale.

Grâce à cette méthode optimisée, Baptiste Kerfriden obtient une augmentation du stock de carbone estimée en moyenne de + 0,07 Pg (10^{15} g). L'estimation du puits de carbone annuel des forêts françaises, obtenue par une régression linéaire en utilisant la méthode bootstrap, est de 13 ± 1 Mt C / an, soit 1 Mt C supérieur à la méthode traditionnelle. Cette nouvelle méthode montre donc une sous-estimation actuelle du stock de carbone aérien forestier. On ne peut pas conclure sur une érosion du puits de carbone annuel.

Méthodes d'estimation sur petits domaines pour l'inventaire forestier national

Ankit Sagar LIF et al.

L'IFN a été mis en place en France en 1958, cependant sur des petits domaines la précision de l'estimation est faible. Ankit Sagar a présenté l'objectif de mise en place d'un inventaire forestier multisource pour accroître la précision des estimations,

notamment à l'échelle des municipalités. La zone d'étude est la forêt de Sologne, dans le centre de la France qui couvre 7000 km².

Les données utilisées pour cet inventaire forestier multisource sont : les points de mesures de l'IFN, la carte forestière, les données de LIDAR et de photogrammétrie, et les images optiques Landsat. L'agrégation de toutes ces données permet de descendre la résolution de l'IFN à l'échelle de la commune.

Effet des sécheresses sur la production de biomasse aérienne et le stockage du carbone au sein d'une forêt de hêtres

Jeanne Touche BEF et al.

En France la forêt couvre 31 % du territoire et est composée à 67 % de feuillus. D'après le GIEC, la fréquence et l'intensité des sécheresses devraient augmenter dans les années à venir. Jeanne Touche s'intéresse à l'impact des sécheresses sur la production de biomasse aérienne et sur le stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers. Pour cela, elle dispose d'un site d'étude en forêt de Montiers (55) où un prototype de dispositif de sécheresse (empêchant la pénétration de la pluie) est installé depuis 2012, appelé « prototype toit ».

Elle a réalisé une comparaison entre les années sèches (où les précipitations sont inférieures à 330 mm entre mai et septembre) et les années humides (précipitations > 400 mm). L'accroissement de la biomasse aérienne dépend du type de sol. Elle note une hiérarchisation de l'accroissement entre les sols de type Alocrisol, Calcibrunisol et Rendisol, le

premier montrant l'accroissement maximal et le dernier l'accroissement minimal. L'effet sécheresse, traduit à travers la transpiration des arbres, est un facteur dominant de la croissance. L'effet de la sécheresse mesuré grâce au « prototype toit » a diminué de 64% la production de biomasse aérienne sur 5 ans et a diminué également le stockage de 2 t/ha/an.

Stockage de carbone en forêt, considérations économiques et risques de non-permanences

Miguel Rivière BETA

La forêt est perturbée par le changement climatique par les sécheresses comme vu précédemment, mais aussi par les incendies, les tempêtes ou les pathogènes, notamment. Ces perturbations représentent donc un risque sur le potentiel d'atténuation de la filière (séquestration ou substitution). Miguel Rivière a d'abord présenté les implications économiques et paysagères d'une politique de compensation carbone, puis des considérations sur les risques de non-permanence du stockage de C en forêt.

Dans le cadre d'une politique compensatoire du carbone, un propriétaire forestier pourrait être rémunéré pour qu'il rende un service environnemental (e.g. séquestration de carbone). Il existe le label Bas Carbone en France qui va dans ce sens et dans certains pays les pratiques de gestion forestières sont orientées pour favoriser la séquestration de carbone. Le rapport Quinet (2019) présente les valeurs à atteindre de la tonne de carbone pour respecter les objectifs d'atténuation du CC et donc de neutralité carbone à l'horizon



2050 (i.e. 90 €/t en 2020, 250 €/t en 2030 et 750 €/t en 2050). Miguel Rivière a réalisé une modélisation afin de connaître la valeur du service rendu de séquestration de carbone dans le cadre de l'atténuation du CC. La compensation carbone serait inégalement répartie sur le territoire avec une séquestration additionnelle située dans les régions moins forestières. Les conséquences seraient une baisse des récoltes à court terme et l'adaptation de la gestion à long terme, qui se traduirait par la présence de forêt plus feuillues.

Dans une seconde partie, Miguel Rivière a parlé de risque incendie et donc de non-permanence du stockage de carbone dans le cas de la séquestration. Le carbone peut en effet être relâché plus tard. Il a présenté des résultats de simulation de l'indice feu météo sur la partie sud de la France pour les années 2070 - 2100. L'indice augmente avec la hausse des températures. Il a ensuite modélisé l'ampleur des surfaces brûlées et utilisé ces résultats dans un modèle d'impact de la filière forêt-bois à la fin du siècle. Ces augmentations d'incendies engendrent donc une baisse des récoltes et des stocks de carbone, une hausse des prix et un enrésinement marginal de la forêt. Le phénomène de feu est régi par une variabilité inter-annuelle à court terme et par le choix du modèle et scénario climatique à long terme. Les impacts sur la filière sont régis par la stochasticité des feux à court terme et le choix du scénario et modèle climatique à long terme.

Table ronde et questions - Session « Forêt et stockage de carbone »

La question de l'évolution des usages de la forêt au XIX^{ème} siècle, notamment de la diminution des prélèvements du fait de l'utilisation de ressources géologiques fossiles (charbon, hydrocarbures...), et de ses relations avec l'accroissement de la surface forestières a été soulevée. En France, une politique forestière a été mise en place dès le début du XIX^{ème} siècle pour gérer l'utilisation des ressources forestières (politique de conversion de taillis en futaie).

Il y a actuellement une dynamique de piégeage du carbone dans la biomasse, mais la séquestration forestière va s'équilibrer dans le temps. La forêt est toujours en transition pendant le CC.

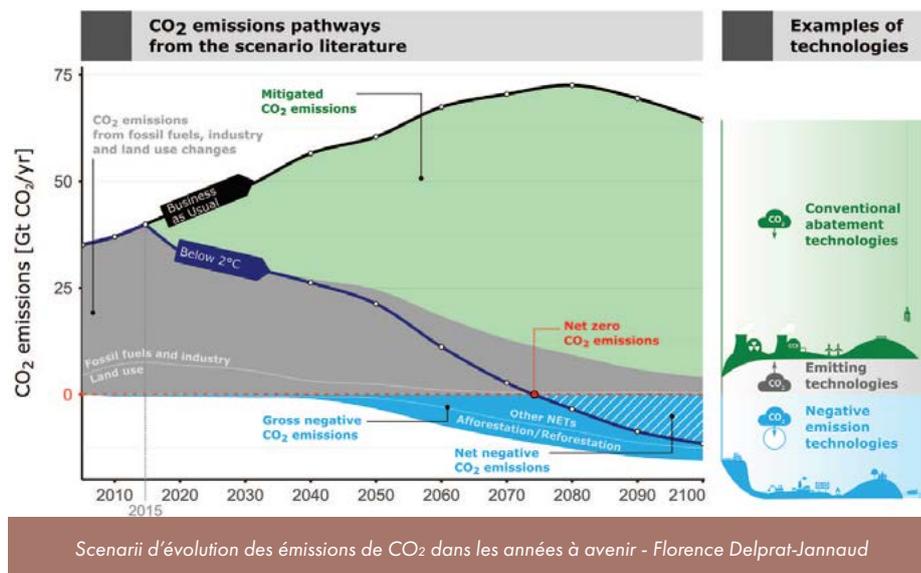
Il est également à noter que dans les

perturbations de la forêt mentionnées, les tempêtes représentent 1 % des stocks de bois tombés sur 15 ans, ce qui est bien supérieur à l'impact des incendies.

Présentation de l'ANCRE et du projet « Puits de carbone »

Florence Delprat-Jannaud IFPEN

L'ANCRE, Alliance Nationale de Coordination de la Recherche sur l'Énergie, comprend 4 membres fondateurs (CEA, CNRS, CPU - Conférence des Présidents d'Universités - , IFP Énergies Nouvelles), 15 membres associés et 15 pôles de compétitivité partenaires.



Ces 5 priorités sont :

- Identifier les enjeux du futur
- Contribuer à l'élaboration des politiques publiques
- Orienter la programmation
- Mobiliser, structurer et fédérer les communautés
- Produire et diffuser les connaissances

L'un de ces objectifs est de produire des scénarios énergétiques de neutralité carbone en France solides. Le projet transverse « Puits de carbone » en est l'un des leviers. Il s'intéresse en particulier aux flux de carbone dans les sols, sous-sols, milieux aquatiques et solutions puits de carbone. Il a pour ambition d'évaluer le potentiel pour la France des solutions « émissions négatives » à l'horizon 2050 et d'identifier les verrous à lever en priorité pour permettre à ces solutions de jouer leur rôle dans les scénarios de neutralité carbone.

Il intègre :

1. Les solutions de captage et de séquestration « naturelles » : altération des roches silicatées, stockage dans les sols et la biomasse aérienne agricoles et forestiers, en milieu urbain, dans les milieux aquatiques
2. Les solutions technologiques : captage et stockage direct du carbone atmosphérique (DAC + CCS), captage de CO₂ atmosphérique par la biomasse énergie (BECCS) et les matières minérales
3. Les solutions mixtes : couplage de solutions et forçage de processus « naturels »

D'après la Stratégie nationale bas carbone (SNBC2), en France, à l'horizon 2050, les puits de carbone devraient représenter 80 Mt CO₂ pour compenser les émissions incompressibles. Ils se composent de 65 Mt CO₂ séquestrées par le secteur des terres (forêts, terres, bois) et de 15 Mt par CCS (dont 10 Mt par les BECCS).

Le comité de projet comprend 25 membres réguliers et 6 sous-groupes de travail thématiques :

1. Photosynthèse et flux de carbone dans les sols agricoles/forestiers
2. Photosynthèse en milieux urbains et anthropisés
3. Minéralisation des roches et en milieux aquatiques (lac/mer/océan)
4. Solutions avec stockage géologique du carbone atmosphérique
5. Solutions de stockage long-terme matériaux (bio-matériaux, béton, résidus)
6. Usages long-terme représentant un puits de carbone

Les livrables d'ici juin 2022 sont :

- La revue des travaux menés en France
- Revue et analyse critique des données de la littérature
- Estimation du potentiel puits de carbone sur le territoire national
- Identification des verrous/manques de connaissances scientifiques et technologiques

Il est à noter que Jacques Pironon, porteur du projet DEEPSURF, est impliqué dans ce projet transverse. DEEPSURF est une référence pour le projet transverse « Puits de carbone » de l'ANCRE.

Table ronde finale et transverse

La table ronde finale, animée par Florence Delprat-Jannaud, a permis des échanges libres entre la salle et les animateurs des trois sessions autour du projet de l'ANCRE et plus largement sur le stockage de carbone et l'objectif de neutralité carbone en 2050. Dans cette trajectoire, la nécessité de conserver une vision réaliste à la fois scientifique, technique et économique sur la composition à moyen terme de notre mix énergétique a fait aussi l'objet d'échanges.

Michel Deshaies a notamment rappelé l'origine des baisses mondiales d'émissions de gaz à effet de serre à partir des années 1990 : la chute de l'URSS et la crise de 2008.

Laurent Saint-André a insisté sur la possibilité de prendre la Lorraine comme exemple et de produire un modèle régional des puits de carbone disponibles. Cette synthèse pourrait se faire dans le cadre du projet DEEPSURF.

Le projet transverse de l'ANCRE est également en relation avec AllEnvi (Alliance de coordination de la recherche sur l'environnement).

La question de la pertinence d'évaluer les puits de carbone à l'échelle nationale a été posée. En effet, la neutralité carbone à l'échelle nationale n'a que peu de sens car le changement climatique est un phénomène global à l'échelle mondiale. Au-delà de l'objectif de neutralité carbone, il faut prendre en compte les importations. La neutralité carbone relève surtout d'une volonté politique.

La question de la biodiversité est à prendre en compte au même titre que celle de la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

La question du développement du génie pédologique pour développer des sols capables de stocker davantage de carbone

a été soulevée. De l'ingénierie pourrait être développée au niveau des friches.

La question des dépôts de cendres en forêt pour maintenir la fertilité des sols face à l'accroissement des prélèvements de biomasse a également été mentionnée.

A l'avenir il risque d'y avoir une compétition entre les différents usages des terres : alimentaire versus énergie. Du fait de cette concurrence, les aides d'État de la filière bioénergie diminuent dans de nombreux pays.



LES ACTIONS À VENIR

Pour l'année 2021

Recrutement de trois post-doctorants :
Clémentine Chirol et Romain Hemelsdaël
en janvier, recrutement du post-doctorant
Woodstock en février 2021

Financement et encadrement de neuf
stagiaires de master 2 en soutien aux jeunes
chercheurs DEEPSURF entre janvier et juin
2021

Matinée de co-construction de la DEEPSURF
Young Researcher Day le 18 janvier 2021

DEEPSURF Young Researcher Day le 16
février 2021

Point d'étape LUE le 17 février 2021

DEEPSURF Conference, toward solutions for
energy and ecological transition, organisée
sur le campus Artem à Nancy du 12 au 14
octobre 2021

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

deepsurf-contact@univ-lorraine.fr

[@IMPACT_DEEPSURF](http://lue.univ-lorraine.fr/impact-deepsurf)

Publication : février 2021
Conception - Réalisation : GeoRessources
Crédit photos : DEEPSURF, membres et
partenaires du projet DEEPSURF,
Laëtitia Vançon

12 OCT
14 T

NANCY
FRANCE

DEEPSURF 2021

TOWARD SOLUTIONS
FOR ENERGY
AND ECOLOGICAL TRANSITION

deepsurf-contact@univ-lorraine.fr



© Université de Lorraine

DEEPSURF CONFERENCE

First announcement - January 2021

In the context of transition to green and renewable energies, major scientific, political and societal challenges are raised by the need to manage energy resources more sustainably, with related reductions in greenhouse gas emissions and enhanced sequestration of greenhouse gases. Such objectives are central to the Green Deal promoted by the European Union. They raise many questions and challenges that will be the subjects of this Conference.



DEEPSURF Conference

DEEPSURF Conference aims to focus on improving knowledge on complex ecosystems and contribute to the debate on ecological and energy transition. The Conference will tackle the question of heat transfer and mass flow (water, hydrocarbons, pollutants and gases) between subsurface, soil, biosphere and atmosphere, as well as impacts on the environment and society's perceptions.

The Conference will focus on new projects on exploitation of soil, underlying rock and biomass (Carbon Capture, Utilization and Storage - CCUS), management of energy vectors (hydrogen, compressed air, water and gases), geothermal energy, mineral resources, nuclear waste storage, biomass energy production, wasteland reclamation, etc.

DEEPSURF Conference proposes to combine approaches to geosphere, biosphere and atmosphere monitoring, as well as modelling in order to minimize related uncertainties and risks, including compensation and remediation mechanisms.

DEEPSURF Conference will comprise plenary sessions on state of the art researches on:

- Carbon storage in the biosphere, soil and underlying bedrock,
- Matter and heat transfer through the critical zone and underlying geological compartments,
- Use of land and subsurface for energy transition purposes.

Specific sessions will also address such topics as data sciences (mathematics) applied to geosciences and/or environmental sciences), geological storage (gases, waste, etc.), the role of low-emission hydrocarbons in energy transition strategies, biomass production and soil ecosystem services, optimization in forest management, agricultural land and wasteland, and metal for energy transition.

Five field trips in the Grand Est region will cover the themes of fossil resources from past to present (coal, oil and gas), salt and its age-old history, geothermal energy, radioactive waste storage, forest monitoring, and pollution of soils and their remediation. Field trips are included in the Conference Pack.

The objective of the conference is to mix together scientists from diverse disciplines: Geosciences, Environment, Soil, Forest Sciences, Applied Mathematics, Geography, History, Economy, and Social and Legal Sciences. Such diversity is necessary in order to debate the major challenges posed by the Green Deal.

Key dates

Call for abstracts: April 2021 - August 2021

Registration opening: April 2021

Program announcement and registration closure: September 2021

Contact information:

Email : deepsurf-contact@univ-lorraine.fr

Website: deepsurf-ic.univ-lorraine.fr

Follow us on Twitter: [@IMPACT_DEEPSURF](https://twitter.com/IMPACT_DEEPSURF)

ANNEXES

Partenaires du projet

9 ÉTABLISSEMENTS PUBLICS



6 ENTREPRISES



12 LABORATOIRES DE RECHERCHE

