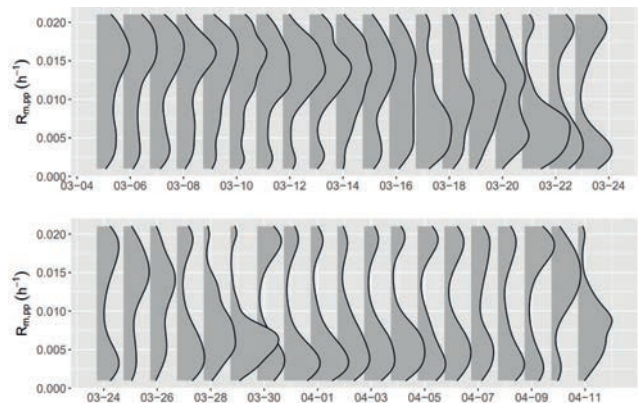
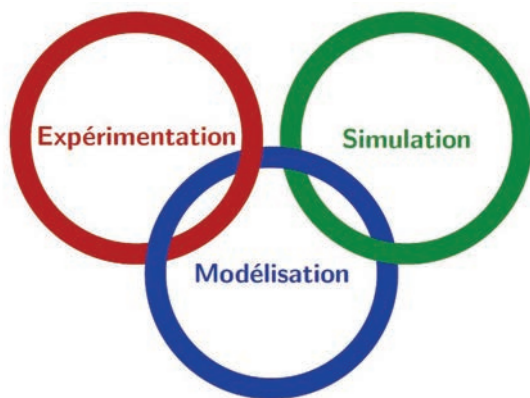


# SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT

L'ambition est d'apporter les connaissances nécessaires pour éclairer les débats scientifiques, techniques, économiques et sociétaux sur les grandes questions relatives à la gestion des ressources naturelles, au rôle que peut jouer le sous-sol dans la transition énergétique, la protection de l'environnement et le développement durable.



Distributions a posteriori de la respiration de maintenance du phytoplancton ( $R_m$ ) caractérisées par ProSe-PA (cf. projet phare p20).

## 1 CENTRE DE RECHERCHE ET 1 INSTITUT DE FORMATION

### ■ CENTRE DE GÉOSCIENCES

Les thèmes de recherche du Centre de Géosciences couvrent des sujets aussi variés que l'approvisionnement en ressources primaires (hydrocarbures, minérales, géothermie), l'utilisation de l'espace souterrain (stockage géologique des déchets radioactifs, stockage géologique du  $CO_2$ , stockage d'énergie sous forme d'hydrocarbures ou de gaz de synthèse, infrastructures souterraines) et enfin la gestion de ressource en eau et des risques naturels (relations atmosphère - sol - sous-sol - réseau hydrique, impacts du changement climatique).

### ■ INSTITUT SUPÉRIEUR D'INGÉNIERIE ET DE GESTION DE L'ENVIRONNEMENT (ISIGE MINES ParisTech)

L'ISIGE est le centre de formation et d'expertise dédié à l'environnement et au développement durable de MINES ParisTech. Interdisciplinaire par essence, il forme depuis plus de 25 ans des professionnels de haut niveau et développe une expertise auprès des entreprises et des territoires en matière de transition écologique.

## « Les activités de recherche couvrent l'essentiel des disciplines des géosciences. »



Trois questions à

**VINCENT LAGNEAU**

RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT

### SPÉCIALITÉ DOCTORALE

#### ■ Géosciences et géoingénierie

- Responsable : Laurent De Windt

### FORMATIONS POST-MASTER MASTÈRES SPÉCIALISÉS

#### ■ MS IGE : Ingénierie et gestion de l'environnement

- Responsable : Valérie Lengart

#### ■ MS ENVIM : International Environmental Management

- Responsable : Cathy Descamps-Large

#### ■ MS Géostatistique

- Responsable : Gaëlle Le Loch

#### ■ MS MIRIS : Mineral Resources Industry & Society (Industrie des ressources minérales et Société)

- Responsable : Jean-Alain Fleurisson

### FORMATION CONTINUE

#### ■ Executive MS RSE-DD : Management global de la RSE et du développement durable

- Responsable : Jasha Oosterbaan

### CHAIRES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

#### ■ ANR ISR-U : Production par récupération *in situ* de l'uranium

- Responsable : Vincent Lagneau

#### ■ Chaire Industrie minérale et Territoires

- Contact : Jean-Alain Fleurisson

### CHAIRE DE MÉCENAT

#### ■ MINAUMET : Maîtrise de la qualité du minerai et des procédés pour une valorisation optimisée des ressources minérales

- Responsable : Damien Goetz

### ■ QUELLES SONT LES SPÉCIFICITÉS DU DÉPARTEMENT ?

**VINCENT LAGNEAU** : Le département comprend le Centre de géosciences, structure de recherche de MINES ParisTech dans le domaine des Sciences de la terre et de l'Environnement, et l'Institut supérieur en ingénierie et gestion de l'environnement (ISIGE), dédié à la formation et l'expertise en matière d'environnement et de développement durable. Les activités de recherche couvrent l'essentiel des disciplines des géosciences. Il s'agit de mieux connaître les ressources primaires du sous-sol et de faire progresser leurs techniques d'exploitation, d'utiliser de manière sûre et économique le sous-sol (stockage d'énergie et infrastructures souterraines de transport), de comprendre et prédire l'effet des forçages climatiques sur la ressource en eau et sur les risques naturels et, enfin, de travailler sur la transition écologiques des territoires.

Le département s'implique largement dans l'enseignement, au sein du cycle Ingénieur civil comme à travers des formations continues et des Mastères spécialisés dédiés à l'environnement, au développement durable, ainsi qu'à la gestion des ressources minérales.

### ■ QUELLES ONT ÉTÉ LES RÉALISATIONS EN 2020 ?

**V.L.** : Le programme de recherche du Centre de géosciences porte largement sur le rôle des Sciences de la Terre dans la transition écologique et énergétique. Outre la production d'énergie géothermique, les possibilités de stockage massif de l'énergie dans le sous-sol sont étudiées dans différents projets, par exemple, le stockage d'hydrogène en cavité saline, *power to gas* en cycle fermé. L'amélioration des outils numériques et l'utilisation et l'amélioration continue de nos plateformes expérimentales permettent d'imaginer des domaines de sollicitation étendus, en tenant compte de l'impact de différents gaz et impuretés associées. Les recherches sur l'exploitation des ressources du sous-sol ont aussi une incidence sur la transition énergétique, qui reposera inévitablement sur une consommation accrue de certains métaux. Ainsi, les travaux sur la récupération *in situ* de l'uranium et les extensions possibles vers d'autres commodités renforcent les compétences sur des techniques plus classiques d'exploitation.

En matière de transition énergétique et écologique, l'ISIGE a accompagné des territoires dans la mise en place de modèles innovants de gouvernance pour la mobilité, la gestion d'énergie et de ressources et la mise en place de l'économie circulaire.

L'enseignement des géosciences a évolué dans le nouveau cycle Ingénieur civil afin d'intégrer au plus près les relations entre Sciences de la Terre et divers enjeux sociétaux. Les enseignements en mode projet et d'autres formes pédagogiques adaptées aux questions de développement constituent le cœur des enseignements développés à l'ISIGE pour le public, très nombreux, de ses MS et des autres enseignements réalisés par le département.

### ■ QUELS SONT LES PROJETS OU AMBITIONS POUR LE DÉPARTEMENT EN 2021 ?

**V.L.** : Le Centre de géosciences continuera sa démarche de construction et de consolidation de codes de calcul scientifique appliqués aux problèmes concrets des Sciences de la Terre, fondés sur la simulation numérique de mécanismes physiques complexes et couplés. De plus en plus, l'approche sera renforcée par une approche mixte entre description physique des processus et assimilation de données. Les outils de caractérisation du Centre, comme la halle de forabilité, pourront jouer un rôle majeur dans l'acquisition de données permettant de mettre au point ces nouvelles approches.

L'ISIGE renforcera ses interactions avec les acteurs du territoire sur les thèmes de l'aménagement et du développement territorial innovant, du métabolisme urbain et sur la résilience climat en lien avec la transition écologique, au travers de partenariats de recherche-action. Par ailleurs, la thématique de l'économie circulaire continue à faire l'objet d'actions de formation et de projets avec les entreprises et éco-organismes, avec, notamment, un approfondissement du travail portant sur le plastique et les impacts environnementaux du recyclage.

# PROJETS PHARE

## DONNÉES ET PROCESSUS

Le Centre de géosciences de MINES ParisTech a historiquement développé une expertise reconnue dans le domaine de la modélisation (e.g. géo-mécanique, écoulements, transport réactif). Ces dernières années, il a souhaité aller plus loin dans l'exploitation des données. Nous donnons ici deux exemples, autour de travaux aboutis en 2020. Le premier projet concerne l'introduction de processus physiques dans les simulations géostatistiques, tandis que le second repose sur l'assimilation des données dans le cadre de l'étude de la qualité de l'eau de la Seine.

### Combinaison de la géostatistique et de simulations à base physique – Application à la caractérisation de panaches de contaminants

La caractérisation de la contamination dans les sols et les nappes autour d'installations industrielles constitue un enjeu majeur de l'assainissement de ces sites. La thèse de Léa Pannecoucke porte sur la combinaison de deux approches utilisées classiquement pour caractériser les contaminations, la géostatistique et les simulations numériques d'écoulement et de transport, afin d'améliorer les estimations d'activités en radionucléides, grâce à l'introduction d'informations de nature physico-chimique dans un modèle probabiliste. Deux méthodes ont été comparées, fondées sur la génération d'un grand nombre de simulations

de panaches de contaminants, prenant en compte les incertitudes sur les paramètres d'entrée. La première méthode est un krigeage avec dérive externe, où la dérive est la moyenne de la population des panaches simulés. La seconde méthode est un krigeage avec un variogramme empirique non stationnaire (« variogramme numérique »), calculé à partir de la population des panaches simulés, qui reflète la structure et la variabilité spatiales du phénomène étudié. Ces méthodes ont été mises en œuvre sur deux sites, situés au voisinage de la centrale de Tchernobyl.

### Simulation du métabolisme de la Seine par assimilation de données en continu

Les données de qualité de l'eau hautes fréquences mesurées par les sondes in situ permettent de calibrer les modèles de simulation de la qualité de l'eau qui utilisent souvent un grand nombre de paramètres pour décrire le fonctionnement biogéochimique des milieux aquatiques. Cependant, cette calibration suppose une paramétrisation statique des modèles qui n'est pas capable de représenter le changement des propriétés physiologiques des communautés vivantes (phytoplancton, bactérie hétérotrophe). Une autre approche pour intégrer les données hautes fréquences est d'utiliser les méthodes d'assimilation de données. Dans ce but, un filtre particulaire a été implémenté dans le logiciel ProSe pour assimiler les données d'oxygène dissous et caractériser les distributions des paramètres du modèle. Les résultats montrent que ProSe-PA (ProSe en Parallèle et Assimilation de données) a beaucoup amélioré la simulation des concentrations en oxygène dissous, surtout pendant les périodes des blooms algaux où la dynamique des phytoplanctons est très difficile à simuler avec le modèle direct ProSe (paramétrisation statique).

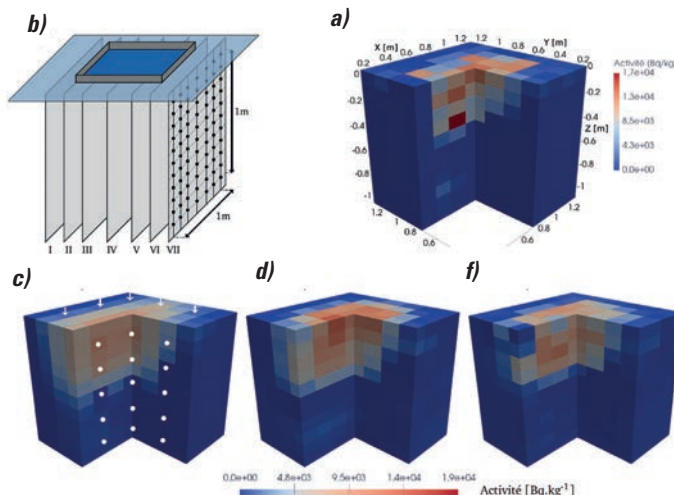


Figure 1 : Grille de mesures d'activité de l'expérience de traçage du site Zaton en 2000 (a) et représentation tridimensionnelle des activités mesurées (b) puis estimées (c) pour un scénario d'échantillonnage (points blancs); de gauche à droite, krigeage « ordinaire », krigeage avec dérive externe et krigeage avec variogramme numérique.

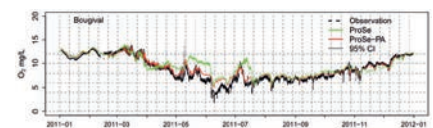


Figure 2 : Concentrations en O2 simulées par ProSe-PA et ProSe à la station Bougival.

**Contacts:**  
 Chantal De Fouquet  
 Nicolas Flipo

## PROJETS H2020 DISCO ET EURAD

## SIMULER LE LONG TERME D'UN STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE DÉCHETS RADIOACTIFS

Le stockage des déchets hautement radioactifs dans le sous-sol géologique représente un grand défi pour les géosciences. Ce mode de stockage est considéré comme la solution optimale pour assurer à long terme la protection des populations et de l'environnement. Sa performance repose sur un système multi-barrières composé de la formation géologique (argile, granite) et de matériaux manufacturés afin de retarder la mise en contact des eaux souterraines avec les déchets et le potentiel relâchement d'éléments radioactifs. Ces barrières de confinement subiront des variations de température et de forts gradients géochimiques pendant une centaine de milliers d'années.

Cet horizon temporel à très long terme nécessite des outils de simulation numérique pour estimer les couplages entre les processus thermiques, hydrogéologiques et géochimiques. Le Centre de géosciences développe son propre code de transport réactif - HYTEC - via le consortium du Pôle Géochimie Transport, ce qui lui permet de participer à deux projets de recherche du programme européen Horizon 2020 dédiés à la gestion durable des déchets radioactifs.

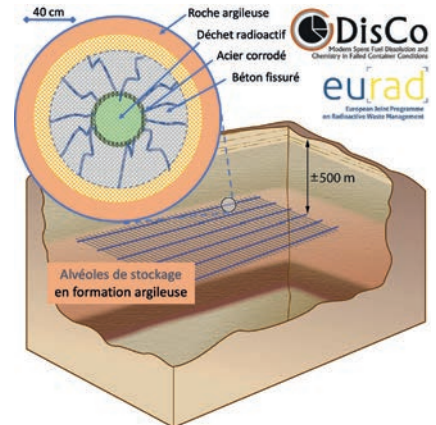
Le projet DISCO, qui a débuté en 2017, vise à combler le manque de connaissances sur la dissolution des combustibles nucléaires alternatifs (MOX, UxPu, O<sub>2</sub>) ou de nouvelle génération (UO<sub>2</sub> dopés au Cr...) en stockage. Les simulations HYTEC ont entre autres permis d'étudier l'effet inhibiteur du Fe<sup>2+</sup>, une espèce réductrice issue de la corrosion du surconteneur en acier, sur la dissolution oxydative du MOX via un mécanisme de consommation rapide du H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> produit par la radiolyse de l'eau et la précipitation de minéraux de Fe<sup>3+</sup> à la surface du MOX. Les cinétiques des réactions et la localisation du front redox en fonction de la radioactivité du MOX ont été quantifiées. Des articles scientifiques et la soutenance d'une thèse de doctorat PSL/MINES ParisTech en 2020 ont découlé de ces recherches.

Le projet EURAD/ACED, qui a débuté en 2019, a pour originalité d'aborder les interactions géochimiques de l'ensemble des composants du système multi-barrières sur la base d'expériences dites « intégrales » et de simulations numériques multi-échelles. Les simulations HYTEC en cours vont permettre d'estimer l'évolution spatiale et temporelle du système complexe verre/acier/béton/argilite pour alimenter les modèles d'étude de performance à l'échelle d'un alvéole de stockage. En

perspective, le Centre de géoscience participera, fin 2021, au sous-projet EURAD/MAGIC en modélisant le couplage chimie-mécanique en stockage.

**Contact :**

Laurent De Windt



Système multi-barrières altéré à long terme en stockage géologique de déchets radioactifs.

## MÉTRIQUES ET PRATIQUES DE LA VILLE PROPRE

## L'ISIGE ANALYSE LE NETTOIEMENT DES MARCHÉS ALIMENTAIRES PARISIENS

Dans le cadre du projet Emergence « Métriques et Pratiques de la Ville Propre » (financé par la Ville de Paris), l'ISIGE a développé plusieurs actions de recherche et de formation par la recherche. Le projet cherche à comprendre l'évolution des pratiques de propreté et les transformations induites par un supposé tournant écologique ou durabiliste de ces politiques. Le dernier mois du programme Envim Europe a ainsi été l'occasion pour les étudiant.es concerné.es de travailler sur l'un des volets de ce projet, en analysant le nettoyage des marchés alimentaires parisiens. En lien avec les services de la Direction Propreté et Eau de la Ville de Paris, étudiant.es et chercheur ont pu enrichir l'analyse documentaire et les entretiens avec les différents acteurs publics et privés du marché et de son nettoyage de visites de terrain dans deux marchés parisiens, le marché Joinville et le marché Berthier. La situation fut d'autant plus particulière qu'il s'agissait des premiers marchés ouverts à la suite du premier confinement, dans une organisation qui restait encore tâtonnante et angoissante en termes sanitaires. Cela a permis de voir en acte un exemple

de « mundane governance », et notamment la manière dont certains dispositifs de propreté sont contournés, transformés, réagencés, dans une négociation permanente entre les équipes de la Ville, les délégataires privés des marchés, les commerçant.es et les riverain.es. C'est cette négociation permanente qui permet de réajuster

les métriques classiques de la propreté, et qui peine encore à faire advenir une vraie écologisation des pratiques de propreté urbaine.

**Contact :**

Cathy Descamps-Large



Nettoyement du marché de Joinville.