

## > Mercredi 3 avril

16 h 00 - 16 h 50 Salle Marie Mauron

### SESSION PARALLÈLE

#### > TRANSFERTS - Processus de transfert des radionucléides dans l'environnement - Session 2

**Président: Frédéric COPPIN**

Docteur, spécialiste en transfert en milieu aquatique

**François GUILLORY** - Modélisation des transferts de radionucléides à l'échelle des bassins versants : *continuum* sol-rivière.

**Séléna FERRERES** - Effet des matières organiques et des micro-organismes sur les transferts d'uranium(VI) aux plantes : une approche moléculaire.

**Meryem MEZIANE** - Développement d'une démarche opérationnelle d'exploitation de la mesure radiologique *in situ* : mieux caractériser les sites contaminés grâce à la géostatistique non-stationnaire.

## SUJET DE LA THÈSE

Modélisation des transferts de radionucléides à l'échelle des bassins versants :  
*continuum sol-rivière*

Doctorant :	François GUILLORY
Date du début de la thèse :	10/10/2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / STAAR / LRTA
Référent IRSN de la thèse :	Hugo LEPAGE
Direction de la thèse :	Hugo LEPAGE / IRSN & Sabine SAUVAGE / CNRS
École doctorale :	Aix Marseille Université - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN

L'une des missions de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire est d'évaluer les risques liés aux rayonnements ionisants et aux substances radioactives. L'IRSN utilise ainsi plusieurs outils pour modéliser les transferts dans les différents compartiments (atmosphère, sol fleuve, mer, biodiversité) et évaluer l'exposition de l'homme, de la faune et de la flore. Si l'outil actuel pour modéliser les transferts au sein des bassins versants est particulièrement adapté à la situation de crise, il n'est pas spatialisé et ne prend pas en compte des éléments essentiels au transfert de la radioactivité tels que l'occupation des sols ou encore le relief. Les travaux portés par cette thèse visent donc à développer un outil plus spatialisé pour évaluer la dispersion du césium-137 des bassins versants, un des radionucléides les plus problématiques en contexte post-accidentel.

Pour y parvenir, la modélisation sera développée à partir d'un outil existant, Soil & Water Assessment Tool (SWAT), fortement utilisé et éprouvé dans de nombreux bassins versants pour simuler l'hydrologie et le transfert de certaines substances telles que les pesticides et nutriments. Un module spécifique au <sup>137</sup>Cs sera développé afin de prendre en compte son comportement dans les bassins versants (transfert sol/plante, fractionnement liquide/solide...), en s'appuyant sur le module déjà existant de transfert du potassium, analogue du césium. Le modèle sera appliqué (1) au bassin versant du Rhône, affecté par les retombées de l'accident de Tchernobyl et instrumenté depuis de nombreuses années par l'IRSN, et (2) à la région de Fukushima en s'appuyant sur les nombreuses données disponibles et sur des travaux préliminaires.

Les travaux de première année ont permis de prendre en main l'outil et de réaliser la calibration et la modélisation des paramètres hydrologiques principaux (débit et charge en suspension) dans un sous-bassin versant du Rhône, l'Ardèche, qui est instrumentée depuis 2016. La calibration complète de l'hydrologie et des sédiments sur l'Ardèche aura nécessité 208 simulations couplées à des analyses bibliographiques et avis d'experts. Nous avons atteint les scores de modélisation de l'hydrologie de  $r^2=0.87$  ;  $KGE=0.91$  ;  $NSE=0.87$ ). La prédiction des matières en suspension est moins bonne car plus complexe à modéliser.

**Mots clés :** modélisation opérationnelle, spatialisation, scénario post, accidentel.

## SUJET DE LA THÈSE

**Effet des matières organiques et des micro-organismes sur les transferts d'uranium (VI)  
aux plantes : une approche moléculaire**

Doctorante :	Séléna FERRERES
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SPDR / LT2S
Référent IRSN de la thèse :	Laureline FEVRIER
Direction de la thèse :	Mirella DEL NERO / CNRS-IN2P3
École doctorale :	Université de Strasbourg - Physique et chimie-physique - ED 182
Financement de la thèse :	IRSN & CNRS

L'objectif de ce travail de thèse est d'identifier, par des analyses à l'échelle moléculaire au cours d'expériences contrôlées en laboratoire portant sur des systèmes modèles, les mécanismes encore peu connus des actions-réactions entre l'uranium(VI) (U(VI)), les communautés bactériennes et les matières organiques complexes (MO), - assemblages supramoléculaires de centaines de molécules organiques de propriétés et réactivité distinctes-, qui influencent la spéciation et les transferts de l'U(VI) dans les continuums eaux-sols-plantes de milieux à radioactivité naturelle renforcée.

Cette thèse s'inscrit dans l'étude des effets de la spéciation sur les distributions de radionucléides dans les écosystèmes. Elle fait partie du projet structurant NEEDS-INSPECT, en lien avec l'étude du site de l'ancienne mine d'uranium de Rophin étudiée dans la ZATU (Zone Atelier Territoires Uranifères), et particulièrement d'une zone humide avec un horizon de subsurface argileux marqué par de fortes concentrations en U (>1000ppm).

Afin d'établir les liens entre spéciation et biodisponibilité de l'U(VI) dans les continuums eaux-sols-plantes, nous avons réalisé une étude préalable d'un sol de la zone humide, et plus particulièrement de l'horizon argileux de sub-surface. Les résultats de cette étude montrent que l'U est mobile dans la fraction colloïdale, qui contient également des nano-minéraux d'oxyde de fer et de la MO. Cela nous a permis de définir les conditions expérimentales de systèmes modèles, aux conditions contrôlées en laboratoire, dont l'étude est toujours en cours. Ces modèles contiennent de la MO naturelle, extraite de l'horizon argileux, et un oxyde de fer (hématite), en présence ou en absence d'une population bactérienne spécifique (*Microbacterium* spp.). Des systèmes binaires (MO-U et MO-minéral) et ternaires (MO-U-minéral) ont été réalisés, puis analysés de manière quantitative par mesure du Carbone Organique Total (MO) et spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) (U), et qualitativement (fluorescence).

Les résultats préliminaires montrent qu'en présence d'hématite, l'uranium favorise l'adsorption de molécules de type "humique", dont une fraction composée d'aromatiques condensées, et forme des complexes ternaires (métallo-organiques) à la surface de l'hématite. L'affinité de l'U(VI) pour les sites de surface du minéral et pour la MO contrôlent son comportement en solution. La première partie de ma troisième année de thèse a été consacrée à l'adaptation des conditions expérimentales afin de pouvoir réaliser ces systèmes en présence de bactéries, tout en gardant des conditions comparables avec les systèmes sans composante biologique.

**Mots clés :** uranium, zatu, matière organique, complexation.

## SUJET DE LA THÈSE

Développement d'une démarche opérationnelle d'exploitation  
de la mesure radiologique *in situ* : mieux caractériser les sites contaminés  
grâce à la géostatistique non-stationnaire

Doctorante :	Meryem MEZIANE
Date du début de la thèse :	17/10/2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SPDR/LT2S
Référent IRSN de la thèse :	Léa PANNECOUCKE
Direction de la thèse :	Chantal DE FOUQUET / École des Mines de Paris (ENSMP)
École doctorale :	Sorbonne université - Géosciences, ressources naturelles et environnement - ED 398
Financement de la thèse :	IRSN

Cette thèse s'inscrit dans les objectifs de la note d'orientations générales de l'IRSN visant à progresser sur les techniques de caractérisation de sites contaminés, notamment sur les méthodes géostatistiques de traitement des données. La gestion des territoires contaminés est une préoccupation majeure suite à des accidents nucléaires ou dans le cadre d'une réhabilitation d'anciens sites miniers ou industriels. Elle s'appuie sur des cartographies dont la qualité dépend des mesures effectuées (nature et densité) et de la méthode d'extrapolation utilisée. Les méthodes d'estimation usuelles supposent la stationnarité spatiale de la contamination : sa continuité spatiale et la taille caractéristique des structures de contamination sont partout identiques. Ces hypothèses sont souvent remises en cause : la géographie et les conditions de dépôt modifient localement les caractéristiques spatiales de la contamination. L'objectif de la thèse est d'établir des méthodes opérationnelles d'estimation, tenant compte de la non-stationnarité.

Le travail repose sur les données de dépôt de Cs-137 d'une campagne aéroportée réalisée après l'accident de Fukushima en 2011. Une mesure est présente tous les 40 m, le long de lignes de vol espacées de 2 km. Des simulations de l'accident ont été réalisées par l'IRSN, fournissant des valeurs de dépôts sec et humide en tant qu'information auxiliaire à utiliser dans les méthodes de géostatistique. Des données d'occupation des sols et de topographie sont également affectées à chaque mesure. Le lien entre toutes ces variables est exploré à l'échelle régionale et de tuiles de 16 km de côté. Puis, afin de combler l'information sur le dépôt, fortement lacunaire orthogonalement aux lignes de vol, différentes méthodes de géostatistique non-stationnaire sont mises en œuvre et comparées : krigeage avec dérive externe, co-krigeage, variogramme numérique, et approche SPDE (Équations aux dérivées partielles stochastiques).

L'analyse exploratoire révèle que les corrélations entre les variables sont très différentes d'une tuile à l'autre. Ces résultats soulignent l'intérêt de prendre en compte la non-stationnarité, en caractérisant les liaisons à l'échelle locale. Une étape de variographie, indispensable aux méthodes géostatistiques, est réalisée. Celle-ci a nécessité divers rééchantillonnages des données en raison de l'hétérogénéité du plan d'échantillonnage. Le rééchantillonnage restitue convenablement les variogrammes même lorsque seules 2 % des données sont conservées. Après modélisation, ces variogrammes ont été utilisés pour obtenir de premières cartes krigées. Des procédures de validation croisée sont élaborées, afin de comparer les différentes méthodes d'estimation, par krigeage ordinaire (stationnaire), dérive externe et co-krigeage.

**Mots clés :** spectrométrie gamma *in situ*, non, stationnarité spatiale, géostatistique.