



Proposition de thèse 2026



Dynamique et spéciation du ^{14}C dans les milieux aquatiques en aval des centres nucléaires de production d'électricité en bord de rivière

Thématiques : environnement, radioécologie, biochimie

Mots clés : carbone 14, milieu aquatique dulçaquicole, mesure, modélisation

Contexte

L'impact des prélèvements et rejets d'effluents chimiques et/ou radioactifs d'un Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) doit être évalué sur les différents compartiments de l'écosystème aquatique récepteur (rivière). Les rejets de substances chimiques et radionucléides (RNs) dans les milieux aquatiques sont réglementés et leur devenir environnemental est surveillé via des campagnes de mesures, réglementaires et non réglementaires, et des projets de recherche. Le carbone 14 (^{14}C) fait partie des RNs majoritaires en termes d'activité rejetée par les CNPE en exploitation. Ce RN à vie longue (période radioactive : 5730 ans) est rejeté à la fois dans le milieu atmosphérique et dans les milieux aquatiques dans le respect de la réglementation.

Le ^{14}C peut être présent dans les effluents liquides des CNPE et les milieux récepteurs (radioactivité naturelle). Il est présent sous différentes formes chimiques, en particulier le Carbone Inorganique Dissous (DIC pour Dissolved Inorganic Carbon), le Carbone Organique Dissous (DOC pour Dissolved Organic Carbon), le Carbone Organique Particulaire (POC pour Particulate Organic Carbon) et cette spéciation (i.e. la distribution de l'élément entre différentes formes chimiques) est encore mal appréhendée. Selon sa forme chimique, le ^{14}C participe au cycle du carbone suivant différents processus biogéochimiques, et sa biodisponibilité vis-à-vis d'organismes du milieu aquatique (e.g. microorganismes, algues, poissons, crustacés) est variable. En conséquence, afin d'améliorer la compréhension des transferts de ^{14}C dans l'environnement aquatique et ainsi accroître la robustesse des modèles opérationnels de transfert du ^{14}C , il est nécessaire de bien caractériser la spéciation du ^{14}C dans les effluents radioactifs liquides ainsi que dans le milieu récepteur dulçaquicole.

Entre 2013 et 2016, une première thèse a été conduite dans le cadre d'une collaboration entre EDF R&D, le LSCE et l'Université Paris-Saclay. Ce travail a été réalisé par C. Coularis et s'intitulait « *Dynamique et transfert du carbone dans le bassin versant de la Loire : Traçage par les isotopes du carbone* ». Cette thèse constitue une référence dans le domaine de l'étude du cycle du carbone en milieu fluvial. En s'appuyant sur l'analyse isotopique du carbone, cette recherche a permis de caractériser les sources, la nature et l'âge du carbone dissous, particulaire, organique et inorganique dans la Loire et ses affluents. L'utilisation du carbone 14 anthropique comme traceur a représenté une avancée méthodologique pour comprendre les dynamiques de transfert du carbone entre les différentes phases. Cette étude et d'autres campagnes ultérieures réalisées dans le cadre d'une collaboration EDF R&D - LSCE ont permis notamment de :

- établir un protocole de prélèvement qui permet de distinguer les principales formes du carbone en milieu aquatique : carbone organique particulaire, carbone organique dissous et carbone inorganique dissous ;
- estimer des « bruits de fond » en $DI^{14}C$, $PO^{14}C$ et $DO^{14}C$ sur la Vienne et la Loire, en amont des CNPE ;
- observer que les bilans de masse en ^{14}C sont bien conservés sur le continuum «proche amont-rejet-proche aval», ne mettant *a priori* pas en évidence d'apports et de pertes sur les tronçons étudiés (à noter cependant une variabilité importante entre les mesures);
- observer que les spéciations du ^{12}C et du ^{14}C sont globalement similaires, que ce soit à l'amont et à l'aval du point de rejet;
- estimer, à l'aide de la modélisation, l'activité en carbone ^{14}C dans la Vienne pour la période de l'étude.

Cependant, en raison du faible nombre de mesures lié aux difficultés d'échantillonnage en milieu naturel et aux défis métrologiques (mesures de concentrations trace), il reste encore de nombreuses questions quant au transfert et au devenir du ^{14}C en milieu aquatique. De ce fait, une thèse articulée autour d'une approche intégrée mêlant acquisition de données expérimentales et modélisation est proposée.

Objectifs de la thèse

L'objectif général du projet de recherche est de progresser dans la connaissance sur le devenir du ^{14}C dans l'environnement aquatique notamment en affinant la caractérisation et le devenir des formes chimiques du ^{14}C en rivière, dans des zones situées hors influence et sous influence des rejets d'effluents radioactifs liquides de CNPE. A cette fin, le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE, UMR CEA CNRS UVSQ) et le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE, EDF R&D) se sont associés afin d'unir leurs compétences notamment dans la caractérisation fine de ^{14}C en concentrations trace dans l'environnement.

Le travail visera à :

1. préciser et étudier la continuité vs discontinuité de la spéciation du ^{14}C sur le continuum amont-rejet-aval d'un ou plusieurs CNPE ;
2. effectuer une comparaison en termes de spéciation entre le ^{12}C stable et le ^{14}C , afin d'identifier si le ^{12}C et le ^{14}C ont la même dynamique dans le cycle du carbone et devenir dans le milieu aquatique;
3. identifier les compartiments potentiels d'accumulation en aval des points de rejet du ^{14}C dans les milieux aquatiques naturels ;
4. optimiser les modélisations sous différents angles et approches à savoir :
 - a. mieux simuler les processus qui régissent la dynamique des transferts entre espèces chimiques du ^{14}C (minéralisation, précipitation, photosynthèse-respiration, lyse cellulaire, décomposition ...);

- b. mieux intégrer la dynamique des transferts du ^{14}C aux interfaces (interface eau-atmosphère, interface colonne d'eau-sédiments)
- c. intégrer l'ensemble des processus dans une modélisation spatiale (aval d'un CNPE ou bassin versant).

Axes de travail

La thèse s'articulera autour de trois axes principaux :

- la collecte *in situ* d'échantillons sur un continuum amont-rejet-aval d'un CNPE, avec les fractionnements *in situ ad hoc* permettant une analyse ultérieure des différentes formes de ^{14}C aux points de prélèvement ;
- l'analyse des échantillons, en particulier dans les laboratoires du LSCE, afin de déterminer les activités en ^{14}C et concentrations en ^{12}C dans les différentes fractions ciblées ;
- l'intégration des nouvelles données conjointement avec les données déjà disponibles (Coularis et al. xxx et ??) et connaissances dans un modèle simulant la dynamique du ^{14}C sur le continuum amont-rejet-aval d'un ou plusieurs CNPE.

1. Collecte in situ d'échantillons

La thèse se concentrera sur un périmètre restreint autour du/des CNPE sélectionné(s), incluant généralement deux points d'observation : un point en amont et un point en aval proche (station de bon mélange des effluents dans le milieu récepteur).

Selon la configuration du site, des échantillons de sédiments de fond seront également collectés, soit par des techniques de carottage ou de bennes à sédiments, soit (si la quantité de sédiments de fond est trop faible lors de la campagne) par des systèmes de collecte *ex situ* (trappes à sédiments ou autres).

Il est précisé qu'en parallèle des campagnes d'échantillonnage prévues dans la thèse, des échantillons seront également collectés simultanément dans les réservoirs de stockage des effluents avant rejet du CNPE. Ces échantillons ne seront pas traités par le LSCE en raison des activités trop élevées, mais dirigés vers un laboratoire spécialisé dans les analyses radioactives. Ils seront toutefois disponibles pour la thèse afin d'évaluer le continuum amont-rejet-aval du ^{14}C .

Afin d'introduire un caractère innovant dans la thèse, on s'attachera à développer, puis mettre en œuvre, des fractionnements plus fins que le fractionnement classique DI^{14}C - DO^{14}C - PO^{14}C . Les fractionnements supplémentaires envisagés visent à discriminer les différentes classes de taille en phase colloïdale par des techniques d'ultrafiltration (par exemple, fractionnement en classes $<1\text{ kDa}$, $1 < <10\text{ kDa}$, $10 < <100\text{ kDa}$, $100\text{ kDa} < <0.2\ \mu\text{m}$). La prise en compte de ces classes de taille permet d'atteindre les propriétés des composés organiques dissous, notamment leur mobilité, leur réactivité et leur accessibilité biologique. Les petites fractions tendent à être plus facilement assimilables, tandis que les fractions colloïdales plus larges présentent une biodisponibilité plus limitée ou différée.

Ces fractionnements ont un fort intérêt dans la perspective d'une modélisation intégrée de la dynamique du ^{14}C en aval des CNPE incluant la dimension biologique, dans la mesure où ces

différentes fractions peuvent présenter des biodisponibilités différentes vis-à-vis des organismes du milieu (e.g. poissons).

2. Analyse du ^{12}C et du ^{14}C dans les différentes fractions dérivées des échantillons d'eau

Les échantillons d'eau collectés sur le terrain feront l'objet d'un fractionnement préliminaire réalisé par le LSCE (séparation des pools DIC, DOC, POC dès l'échantillonnage) et d'un fractionnement complémentaire par classes de taille mis en œuvre par EDF au moyen de technique d'ultrafiltration¹. Les fractions obtenues seront ensuite analysées en teneur en carbone et en ^{14}C par le LSCE pour les échantillons non enrichis en ^{14}C , dans la limite de 250 mesures² ^{14}C réalisables sur la durée de la thèse (hors standards). Les fractions provenant d'échantillons susceptibles d'être enrichis en ^{14}C seront quant à elles, analysées, pour leur teneur en carbone et leur activité ^{14}C , au sein de laboratoires habilités, extérieurs au LSCE.

~~seront analysés, en majorité dans les laboratoires du LSCE. Le doctorant sera encadré et formé aux techniques d'analyses par le personnel du LSCE et traitera la majorité des échantillons, sous la supervision de son/ses encadrants sur place.~~

~~Les capacités du laboratoire étant limitées (en termes de disponibilité matériel, MO experte et habilité et durée d'analyse), le nombre d'échantillons pouvant être traités sur la durée totale de la thèse sera discuté précisément avec le personnel du LSCE. On peut toutefois à ce jour estimer qu'un nombre raisonnable d'échantillons devant faire l'objet d'une mesure ^{14}C s'élèverait à environ 250 mesures.~~

3. Modélisation de la dynamique du ^{14}C sur le continuum

Les bases fondamentales permettant de modéliser le cycle du carbone dans les systèmes aquatiques existent et méritent un travail de sélection, les formulations mathématiques étant nombreuses pour certains processus.

Un travail d'harmonisation des modèles (par exemple, mise en cohérence des modèles de qualité d'eau traitant exclusivement du ^{12}C et des modèles radioécologiques traitant du ^{14}C) est à ce jour nécessaire.

Le développement du modèle devra suivre les étapes classiques, à savoir :

1. La définition conceptuelle du modèle (identification des processus, sélection des formulations mathématiques) ;
2. La paramétrisation du modèle, incluant la paramétrisation générique (i.e. commune à tous les cours d'eau) ou spécifiques (i.e. valeurs de paramètres dépendant du cours d'eau) ;
3. Le calage
4. Confrontation du modèle à des données.

¹ Les modalités de collecte, de conservation et de prétraitement des échantillons d'eau avant leur séparation par classes de taille feront l'objet d'une attention particulière afin de préserver au mieux la distribution de taille initiale de la matière organique dissoute. Il sera également nécessaire d'évaluer l'innocuité des résines et dispositifs d'ultrafiltration, ceux-ci pouvant introduire du carbone dépourvu de ^{14}C et ainsi biaiser les mesures.

² 1 point de collecte := 1 échantillon = plusieurs fractions = plusieurs mesures

Les données collectées dans le cadre de la thèse serviront à la phase de calage et/ou de validation du modèle.

Le travail de modélisation sera encadré par EDF-R&D-LNHE et bénéficiera de l'expertise en géochimie et cycle du carbone du LSCE.

Calendrier de la thèse

Année	2026	2027				2028				2029		
Trimestre	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3
Définition des techniques de fractionnement complémentaires												
Définition des techniques de collecte des sédiments de fond												
Préparation des campagnes												
Réalisation de campagnes d'échantillonnage												
Formation aux techniques d'analyse												
Analyse des échantillons												
Définition et prise en main du modèle												
Modélisation												
Valorisation des résultats												
Rédaction mémoire												

Encadrement et lieu des travaux

La thèse sera conduite dans le cadre d'un dispositif CIFRE, garantissant une collaboration étroite entre le monde académique et industriel. Elle associera EDF, en charge de l'organisation des campagnes d'échantillonnage et du pilotage des travaux de modélisation, et le LSCE, qui assurera les analyses chimiques au sein de ses laboratoires ou de ceux de ses partenaires. Cette complémentarité permettra de croiser les expertises terrain, analytique et numérique.

Il faut peut-être faire une proposition de positionnement géographique de la personne selon le calendrier d'avancée de la thèse ?

Les encadrants de la thèse seront :

- A EDF R&D, Chatou :

- Philippe Ciffroy, Chercheur Senior en Radioécologie, Ecotoxicologie et Risques sanitaires ;
- Marilia Morganti, Chercheur en radioécologie
- Mélanie Lorthioy, Chef de projet R&D

- Au LSCE, Gif sur Yvette :
 - Christine Hatté, HDR, Correspondante scientifique du laboratoire de datation au ^{14}C , *ECHOMICADAS*. Professeur à la Silesian University of Technology, Gliwice (Pologne) ;
 - Nadine Tisnérat-Laborde, ingénieure-chercheuse CEA. Spécialiste de la préparation et de l'analyse du ^{14}C par spectrométrie de masse par accélérateur (AMS).
 - François Thil, ingénieur de recherche CNRS, responsable du *Laboratoire de recherche en datation ^{14}C – ECHOMICADAS*.

EDF :

EDF R&D

Département LNHE – Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement
6 quai Watier
78401 CHATOU

LSCE :

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE)
UMR CEA CNRS UVSQ 8212
CEA Saclay, Bat 714, Site de l'Orme des Merisiers
Université Paris Saclay
F-91191 Gif sur Yvette Cedex – France

Pour candidater

Les candidat·e·s intéressé·e·s sont invité·e·s à envoyer un dossier comprenant un CV, une lettre de motivation, les relevés de notes de M1/M2 (ou équivalent) et les coordonnées de personnes pouvant fournir des références aux adresses suivantes :

philippe.ciffroy@edf.fr

marilia.morganti-mantovanini@edf.fr

melanie.lorthioy@edf.fr

nadine.tisnerat@lsce.ipsl.fr

christine.hatte@lsce.ipsl.fr

francois.thil@lsce.ipsl.fr