



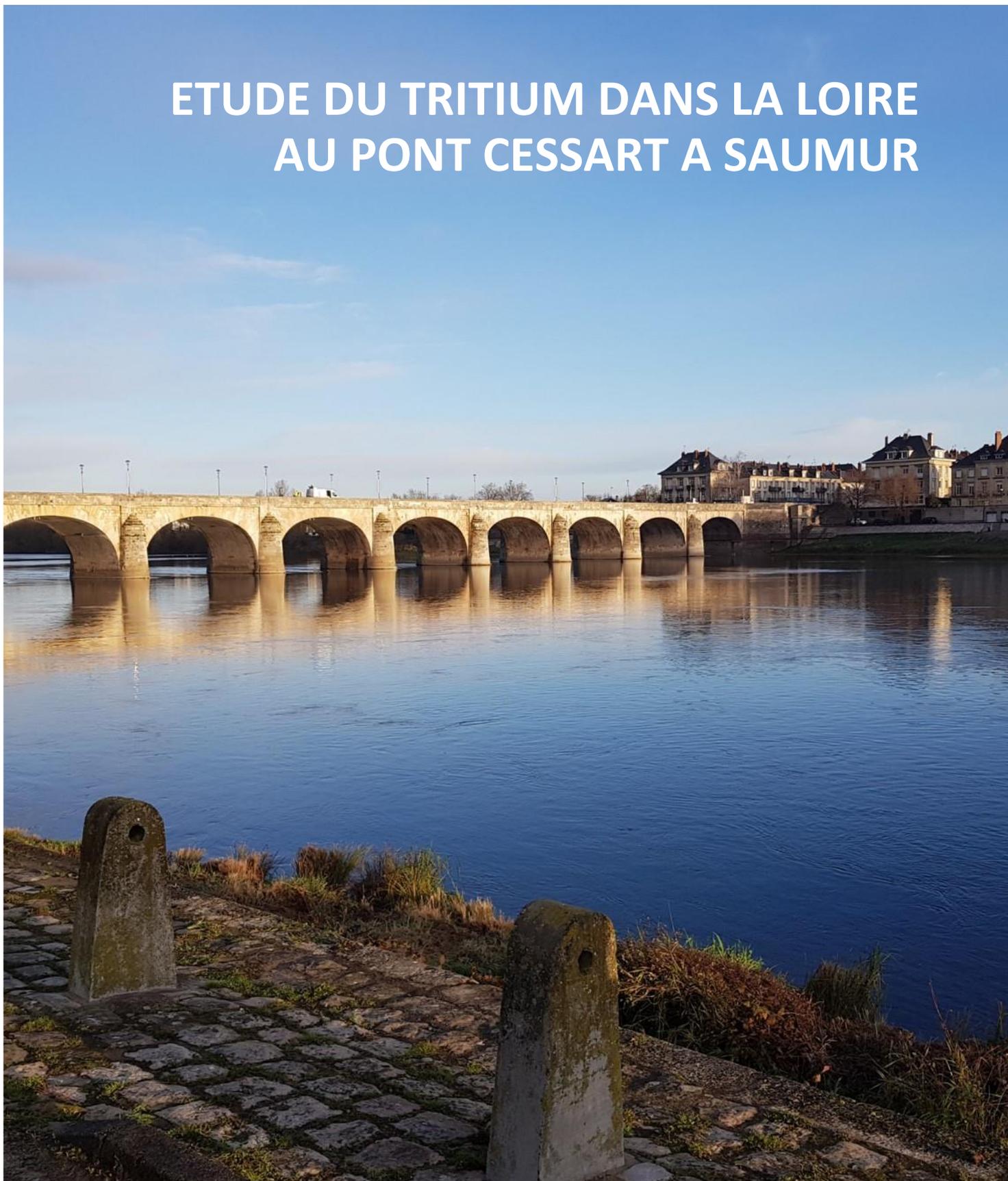
RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

ETUDE DU TRITIUM DANS LA LOIRE AU PONT CESSART A SAUMUR



L'EXPERT PUBLIC DES RISQUES NUCLEAIRES ET RADIOLOGIQUES

Expertiser, rechercher, protéger, anticiper, partager, telles sont les missions de l'IRSN au service des pouvoirs publics et de la population.

La singularité de l'Institut réside dans sa capacité à associer chercheurs et experts pour anticiper les questions à venir sur l'évolution et la maîtrise des risques nucléaires et radiologiques.

Les femmes et les hommes de l'IRSN ont à cœur de faire connaître leurs travaux et de partager leurs savoirs avec la société. Ils contribuent ainsi à améliorer l'accès à l'information et le dialogue avec les parties prenantes.

L'Institut concourt aux politiques publiques de sûreté et sécurité nucléaires, de santé, d'environnement et de gestion de crise.

Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC), sous la tutelle conjointe du ministre chargé de l'Environnement, du ministre de la Défense, et des ministres chargés de l'Énergie, de la Recherche et de la Santé, l'IRSN inscrit pleinement son action dans les politiques de modernisation de l'État avec sa démarche de management des risques et la mise en œuvre d'une politique globale en matière de responsabilité sociétale

Dans le cadre de ses missions, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) contribue notamment à la veille permanente en radioprotection sur le territoire national.

À cet égard, la surveillance radiologique de l'environnement, réalisée par l'IRSN, participe à :

- la vérification du fonctionnement des installations qui rejettent de la radioactivité dans l'environnement ;
- l'analyse de l'évolution des niveaux de radioactivité – dans le temps et l'espace – et à la détection d'élévations inhabituelles de ces niveaux ;
- l'évaluation de l'exposition des populations et des écosystèmes aux rayonnements ionisants ;
- la mise en place de moyens susceptibles d'être mobilisés en situation d'urgence radiologique ou en situation post-accidentelle ;
- la qualification des modèles de dispersion de la radioactivité dans l'environnement et d'évaluation de ses impacts.

Elle est assortie d'une obligation de transparence qui conduit l'Institut à publier régulièrement ses résultats de mesure et des synthèses sur l'état radiologique des territoires.

Depuis sa création l'IRSN a développé une politique d'ouverture à la société qui constitue un des axes stratégiques de progrès, inscrit dans ses contrats d'objectifs successifs signés avec l'État. En 2009, l'Institut a ancré ses engagements dans une Charte composée de six engagements dont la transparence de ses travaux, le partage de ses connaissances et l'accompagnement des acteurs de la société dans l'acquisition des compétences nécessaires à leur implication et construire avec eux l'évaluation des risques. C'est dans ce contexte d'évolution des attentes et des questionnements exprimés par les parties prenantes que l'IRSN poursuit et renforce sa politique d'ouverture à la société.



DES RESEAUX DE PRELEVEMENT ET DE MESURE CONÇUS POUR UNE SURVEILLANCE REGULIERE

La surveillance radiologique régulière de l'environnement faite par l'IRSN repose sur des réseaux de balises de télédétection et de stations de prélèvement des milieux, installés de manière permanente en des points particuliers du territoire, au plus proche des installations nucléaires ou en dehors de l'influence de celles-ci.

Deux réseaux pour surveiller l'air

- **Le réseau Téléray**, constitué de sondes qui mesurent en continu le débit de dose gamma ambiant dans l'air. Elles transmettent en temps réel leurs données à la salle de télésurveillance de l'IRSN, et sont mises à disposition du public en quasi temps réel via un site web (www.teleray.irsn.fr). Dès qu'une augmentation anormale de radioactivité est détectée, une alarme est envoyée à l'IRSN et une investigation est menée.
- **Le réseau OPERA-Air**, qui est constitué de préleveurs d'aérosols fonctionnant en continu. Ils permettent d'obtenir une mesure précise, grâce à une analyse en laboratoire, des radionucléides fixés sur les aérosols présents dans l'air.

Deux réseaux pour surveiller l'eau

- **Le réseau Hydrotéléray** mesure en continu la radioactivité des principaux fleuves français recevant les effluents des centrales nucléaires.
- **Le réseau des hydrocollecteurs** prélève en continu les eaux et les matières en suspension dans les cours d'eau situés généralement en aval des installations nucléaires.

Un réseau pour surveiller les aliments

Avec l'aide des réseaux de préleveurs et des laboratoires de la Direction générale de l'alimentation (DGAL) et de la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), l'IRSN organise la collecte périodique et la mesure de denrées alimentaires pour en évaluer la radioactivité.

Et les autres compartiments...

L'IRSN complète cette surveillance régulière par le prélèvement et l'analyse d'autres supports environnementaux de la radioactivité (sol, herbe, sédiment, mousse terrestre, mousse aquatique, algue, ...). Ils permettent l'établissement de chroniques précieuses dans l'optique d'une analyse temporelle des évolutions.

ET UNE APPROCHE TERRITORIALISÉE...

En complément de sa surveillance régulière, l'IRSN réalise des études ponctuelles à l'échelle régionale ou bien centrées sur l'environnement proche des installations nucléaires.

Les premières appelées « constats radiologiques régionaux » font la synthèse des connaissances relatives aux niveaux de radioactivité naturelle et artificielle sur l'emprise géographique d'une région, d'un territoire ou d'un bassin versant. Elles permettent la mesure d'échantillons rarement analysés, de denrées présentant une valeur économique particulière pour le territoire et de répondre à des attentes ou des questions particulières des parties prenantes. Elles contribuent également à établir une cartographie des zones d'influence des principales installations nucléaires d'une région et à actualiser les connaissances sur le bruit de fond radiologique local hors zone d'influence des installations nucléaires.

Les secondes appelées « Etudes radiologiques de sites » ont pour objectif d'affiner les connaissances sur l'influence radiologique d'une installation nucléaire sur son environnement proche, d'estimer de manière réaliste - par des mesures spécifiques combinées à des modélisations - les expositions des populations avoisinantes et d'associer les acteurs de la société civile à l'étude et à sa restitution.

... POUR DES MESURES RENDUES PUBLIQUES

Que ce soit dans le cas de la surveillance régulière, avec les réseaux de surveillance des différents milieux ou bien dans le cadre d'études ponctuelles, l'IRSN diffuse vers le public l'ensemble des résultats de ses mesures. Pour les mesures réalisées en temps réel par le réseau Téléray, la publication des résultats est quasi instantanée via un site web dédié (www.teleray.irsn.fr). Les mesures nécessitant un traitement préliminaire des échantillons et donc un temps d'acquisition plus long (cas des denrées par exemple) sont diffusées, quant à elles, dès que disponibles, sur le site public du RNM (www.mesure-radioactivite.fr).

RESUME

Le 18 juin 2019, l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO) publiait les résultats d'une campagne de mesures citoyennes dans la Loire et la Vienne. Elle attirait l'attention du public et des autorités sur le niveau anormalement élevé d'une des mesures de concentration en tritium (310 Bq/L), effectuée sur un prélèvement d'eau réalisé le 21 janvier 2019 dans la Loire, à Saumur, au niveau du pont Cessart.

Après avoir pris connaissance des résultats publiés par l'ACRO, l'IRSN a indiqué qu'un tel niveau était très supérieur aux niveaux habituellement mesurés dans la Loire au moyen des outils de surveillance de routine. En effet, la concentration la plus élevée mesurée en tritium dans la Loire depuis 2012 à la station multi-paramètres (SMP) aval du CNPE de Chinon et déclarée au RNM était de 80 Bq/L, et la concentration en tritium la plus élevée à Saumur estimée par l'IRSN à partir des données de la surveillance sur la période 2017-2019 était de 60 Bq/L.

L'IRSN et l'ASN ont étudié plusieurs pistes pour tenter d'expliquer cette mesure atypique : hypothèse d'un rejet exceptionnel du CNPE de Chinon ou de plusieurs CNPE amont, hypothèse d'une autre source de tritium, analyse du processus de prélèvement et de mesure du 21 janvier 2019. En octobre 2020, l'IRSN concluait de ses investigations préliminaires que l'hypothèse d'un mélange imparfait des rejets de la centrale de Chinon, entraînant une hétérogénéité de distribution du tritium dans le lit du fleuve sur de longues distances, du fait de conditions hydrauliques particulières, méritait d'être approfondie par une étude sur le terrain.

L'IRSN et l'ASN ont donc décidé de réaliser une campagne spécifique de mesure, qui s'est déroulée sur cinq mois de novembre 2020 à avril 2021, mettant en œuvre des prélèvements à « haute fréquence » (7 par jour en 5 points différents) à Saumur, afin d'étudier la reproductibilité de la mesure atypique, dans des conditions les plus proches possibles de celles observées en janvier 2019.

Cette campagne de mesure avait également pour objectif d'améliorer la compréhension de la dynamique de dispersion du tritium entre le CNPE de Chinon et Saumur. Aussi, parallèlement aux mesures acquises sur le terrain, des modélisations monodimensionnelles et bidimensionnelles des concentrations en tritium dans la Loire ont été réalisées par l'IRSN, à partir des rejets déclarés par EDF et des données hydrauliques des cours d'eau sur la période considérée. Les résultats de ces modélisations ont été comparés aux mesures des prélèvements réalisés pendant la campagne au transect du pont Cessart à Saumur et aux mesures de surveillance de l'environnement réalisées environ 6 km en aval du CNPE de Chinon afin d'aider à leur interprétation.

Cette étude avait enfin comme objectif d'en partager les enseignements avec les parties prenantes. C'est ainsi qu'un Comité de suivi de l'étude, rassemblant les parties prenantes intéressées (Cli de Chinon, élus locaux, associations, autorités, exploitant...) a été mis en place. Au cours de quatre réunions spécifiques de ce Comité, l'IRSN a présenté les résultats de l'étude au fur et à mesure de leur acquisition et les échanges au sein du Comité ont nourri la réflexion.

Cette étude a permis d'exploiter plus de 1000 mesures de la concentration en tritium dans la Loire acquises, sur une période de cinq mois avec des conditions de rejet et environnementales variées (débit, température...). Les niveaux de ces mesures ont varié entre le seuil de décision (2,3 Bq/L environ) et 57 Bq/L. Par ailleurs, les modélisations 1D et 2D de la dispersion du tritium entre Chinon et Saumur mises en œuvre pour cette étude ont présenté un haut niveau de cohérence avec les mesures de terrain.

Les résultats rendent peu probable que l'hypothèse d'un mélange imparfait (y compris lié à une stratification thermique) des rejets du CNPE de Chinon dans le milieu, sur de longues distances, puisse expliquer la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019. En effet, les modélisations 1D et 2D de la dispersion du tritium dans la Loire, calées à partir des mesures d'EDF, de l'IRSN et de l'ACRO et intégrant les conditions (rejets déclarés, débits) de janvier 2019, conduisent à une concentration maximale en tritium dans la Loire au pont Cessart à Saumur, le 21 janvier 2019, variant entre 70 Bq/L et 160 Bq/L suivant les hypothèses retenues pour le paramétrage hydrographique. Ces modélisations n'ont donc pas permis, même dans des conditions majorantes, de retrouver le niveau de la mesure atypique (310 Bq/L).

En réponse à des questionnements des parties prenantes sur l'influence d'un hypothétique mauvais fonctionnement de la clarinette des rejets du CNPE de Chinon le 21 janvier 2019, les modélisations bidimensionnelles ont montré, qu'un dysfonctionnement de la clarinette de rejet pourrait impacter les concentrations en tritium dans les eaux de la Loire dans le champ proche du rejet mais qu'il n'aurait que très peu d'effet à l'aval de la confluence avec la Vienne, en particulier à Saumur, et ne pourrait pas expliquer pas la mesure atypique.

Suite à l'événement significatif déclaré par EDF en septembre 2020 et à la demande des parties prenantes, l'IRSN a modélisé le cas hypothétique d'un rejet ayant une concentration en tritium 4 fois supérieure à celle rapportée dans le registre de rejet du CNPE de Chinon de janvier 2019. Dans ces conditions, la concentration en tritium dans l'axe du panache atteindrait à Saumur des niveaux équivalents ou supérieurs à la valeur atypique de 310 Bq/L. Cette hypothèse semble

cependant peu plausible compte tenu notamment de la concentration induite dans l'effluent, qui dépasserait de façon très significative les niveaux des effluents des registres de rejets entre janvier 2018 et avril 2021 pour le CNPE de Chinon.

Concernant les mesures de surveillance en aval du CNPE de Chinon, cette étude a montré que du fait du positionnement du point de prélèvement – situé à 5 m de la rive gauche, ce qui le place plus ou moins en bordure gauche des panaches de rejet de ce CNPE en fonction du débit de la Loire – les prélèvements à la SMP aval peuvent être représentatifs ou non des rejets de la centrale :

- pour des débits inférieurs à 100 m³/s, les mesures mi-rejet à la SMP sont représentatives des rejets du CNPE de Chinon ;
- pour des débits supérieurs, les mesures à la SMP deviennent essentiellement représentatives des conditions amont et ne détectent pas ou très peu les rejets du CNPE.

Les modélisations montrent que la détection, au moyen des prélèvements à la SMP aval, d'un éventuel rejet non maîtrisé supérieur aux prévisions établies par l'exploitant n'est pas systématique.

Enfin, pour capitaliser les connaissances acquises lors de cette étude et en tirer les enseignements, l'IRSN formule à la fin de ce rapport différentes recommandations. Elles portent notamment sur le développement de la modélisation des rejets des CNPE pour confirmer la représentativité des mesures de surveillance ainsi que sur l'importance du respect des normes et des bonnes pratiques de traçabilité concernant les prélèvements et les mesures. Ces recommandations appellent également à étudier comment la détection des rejets du CNPE de Chinon par la SMP aval pourrait être rendue moins dépendante des régimes hydrauliques de la Loire et notamment garantir la détection d'éventuels rejets non maîtrisés de ce CNPE. En outre, elles invitent à poursuivre les vérifications régulières du bon fonctionnement de la clarinette de rejets et à apporter des corrections sur la déclaration au RNM des dates de mesure des prélèvements aliquotes moyens journaliers et à expliquer comment sont déterminées les mesures à mi-rejet en cas de rejets longs et/ou fractionnés.

En annexe, les parties prenantes à cette étude (membres du Comité de suivi) ont été invitées, si elles le souhaitent, à faire part de leurs commentaires sur ce rapport.

SOMMAIRE

1. ORIGINE ET CONTEXTE DE L'ETUDE	9
1.1 COMPARAISON AVEC LES MESURES DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT.....	9
1.2 ESTIMATION PAR MODELISATION DE LA CONCENTRATION EN TRITIUM DANS LA LOIRE A SAUMUR LE 21 JANVIER 2019	10
1.3 LANCEMENT D'UNE CAMPAGNE DE MESURE DU TRITIUM DANS LA LOIRE	12
1.4 MESURES REALISEES PAR LES ASSOCIATIONS DANS LA LOIRE ET LA VIENNE	13
— La mesure à 310 Bq/L en tritium dans la Loire à Saumur du 21 janvier 2019	13
— Mesures réalisées par l'ACRO au pont Cessart.....	14
1.5 INVESTIGATIONS PRELIMINAIRES POUR IDENTIFIER LES ORIGINES POSSIBLES DE LA MESURE DU 21 JANVIER 2019	16
1.6 LES CNPE DU BASSIN VERSANT ET LEURS REJETS.....	18
1.7 LA REGLEMENTATION DES REJETS.....	18
1.8 LA SURVEILLANCE DES REJETS PAR LES CNPE ET PAR L'IRSN	21
2. REALISATION DE L'ETUDE.....	23
2.1 LES OBJECTIFS.....	23
2.2 ETUDE PRELIMINAIRE EN SEPTEMBRE 2020	24
— Présentation.....	24
— Résultats	26
2.3 LA CAMPAGNE DE PRELEVEMENT	28
— Déploiement et installation du matériel à Saumur	28
— Réalisation de la campagne de prélèvement	30
— Traitement et mesure.....	32
2.4 OUTILS DE MODELISATION DE L'IRSN ET DEMARCHE	32
— Préparation des modèles pour l'étude	32
2.5 MISE EN PERSPECTIVE DES CONDITIONS RENCONTREES PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURE.....	58
— Conditions environnementales – débit, température et largeur de la Loire.....	58
— Rejets déclarés des CNPE du bassin versant de la Loire	61
— Bilan de la mise en perspective des conditions rencontrées pendant la campagne de mesures.....	63
3. LE COMITE DE SUIVI.....	64
3.1 MEMBRES, OBJECTIFS ET FONCTIONNEMENT	64
— Création du Comité de suivi.....	64
— Membres du Comité de suivi de l'étude	64
— Objectifs et fonctionnement du Comité de suivi de l'étude	64
— Visite des dispositifs au pont Cessart.....	65
3.2 ETUDES TECHNIQUES PRESENTEES PAR DES MEMBRES DU COMITE	65
— Etude thermographique par la Cli de Chinon	65
— Campagnes d'étude de dilution d'EDF	67
3.3 POINT SUR LES EAUX DE BOISSON.....	73

4. RESULTATS DE L'ETUDE	74
4.1 CAMPAGNE DE MESURES AU PONT CESSART DE NOVEMBRE 2020 A AVRIL 2021	74
— Mesure des concentrations en tritium dans la Loire et exploitation des résultats	74
— Mesure de température et stratification thermique.....	80
— Comparaison entre la modélisation 1D et les mesures IRSN au pont Cessart	81
— Comparaison entre la modélisation 2D et les mesures ACRO et IRSN au pont Cessart.....	88
4.2 A LA STATION MULTI-PARAMETRES AVAL DU CNPE DE CHINON	95
— Mesures des concentrations en tritium et exploitation des résultats	95
— Représentativité de la SMP aval vis-à-vis des rejets du CNPE de Chinon.....	97
5. APPLICATION A LA MESURE AU PONT CESSART EN JANVIER 2019.....	109
5.1 MODELISATION 1D	109
5.2 MODELISATION 2D	111
— Paramétrage hydrographique.....	111
— Paramétrage des débits.....	111
— Paramétrage des sources de tritium	111
— Résultats	112
5.3 HYPOTHESE D'UN MAUVAIS FONCTIONNEMENT DE LA CLARINETTE DE REJET	113
5.4 HYPOTHESE D'UNE ERREUR DE REJET	114
6. MODELISATION COMPLEMENTAIRE APPLIQUEE À L'EVENTEMENT DE SEPTEMBRE 2020.....	118
6.1 CONTEXTE	118
6.2 MODELISATION	119
— Paramètres.....	119
— Résultats	120
7. CONCLUSIONS	123
8. RECOMMANDATIONS.....	129
9. REMERCIEMENTS	131
10. ANNEXES.....	132
10.1 REPRESENTATION DES DONNEES.....	132
10.2 MODELISATION 1D : PLATEFORME SYMBIOSE ET CODE CASTEAUR	133
— Modélisation du domaine de calcul	133
— Modélisation de l'hydraulique.....	133
— Modélisation des concentrations	134
— Synthèse des paramètres de calcul.....	134
10.3 MODELISATION 2D : CASTEAUR 2D.....	136
— Modélisation du domaine de calcul	137
— Modélisation de l'hydraulique.....	137
— Modélisation des concentrations	138
— Synthèse des paramètres de calcul.....	140

10.4 PARAMETRAGE DES BIEFS DE CALCUL ET MATRICES DE CONNECTIVITE POUR LA MODELISATION 2D	141
— Campagne du 27 mars 2019.....	141
— Campagne du 24 juin 2020	142
— Campagne du 25 octobre 2017	145
10.5 RESULTATS D'ANALYSE DES PRELEVEMENTS REALISES EN DOUBLON LORS DES VISITES DE VERIFICATION	147
10.6 CONCENTRATIONS EN TRITIUM DANS L'EAU DE LA LOIRE	148
— Résultats des analyses des prélèvements réalisés pendant la campagne.....	148
— Représentation graphique	177
10.7 PARTICIPANTS AU COMITE DE SUIVI	182
10.8 COMMENTAIRES DES PARTICIPANTS AU COMITE DE SUIVI	183
— J. Terracher (membre de la CLI de Civaux)	183
— ACRO	187
— EDF	187
— Président de la Cli du CNPE de Chinon (Franck Chartier).....	188
 11. GLOSSAIRE	 189

ORIGINE ET CONTEXTE DE L'ETUDE

Le 18 juin 2019, l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO), publiait les résultats d'une campagne de mesures citoyennes dans la Loire et la Vienne. Elle attirait notamment l'attention du public et des autorités sur le niveau anormalement élevé d'une des mesures de concentration en tritium (310 Bq/L) effectuée sur un prélèvement d'eau réalisé le 21 janvier 2019 dans la Loire, à Saumur, au niveau du pont Cessart. L'IRSN a alors engagé des investigations, en lien avec l'ASN, pour essayer de comprendre l'origine de cette mesure atypique¹.

1.1 COMPARAISON AVEC LES MESURES DE SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

Après avoir pris connaissance des résultats publiés par l'ACRO, l'IRSN indiquait qu'un tel niveau de tritium dans l'environnement n'était pas de ceux qu'on observe habituellement dans la Loire au moyen des outils de surveillance installés en permanence. Il précisait que :

- 80 Bq/L était la concentration en tritium la plus élevée enregistrée dans la Loire à la station multi-paramètres aval du CNPE de Chinon depuis 2012 et déclarée au Réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM, www.mesure-radioactivite.fr) (Figure 1) ;
- 60 Bq/L était la concentration en tritium la plus élevée à Saumur estimée par l'IRSN à partir des données de la surveillance sur la période 2017-2019 (Figure 2).

Il mettait également ces niveaux en perspective des mesures de concentrations en tritium de surveillance effectuées en aval des autres CNPE situés sur la Loire (Belleville, Dampierre, Saint-Laurent) et la Vienne (Civaux) ainsi qu'à Angers.

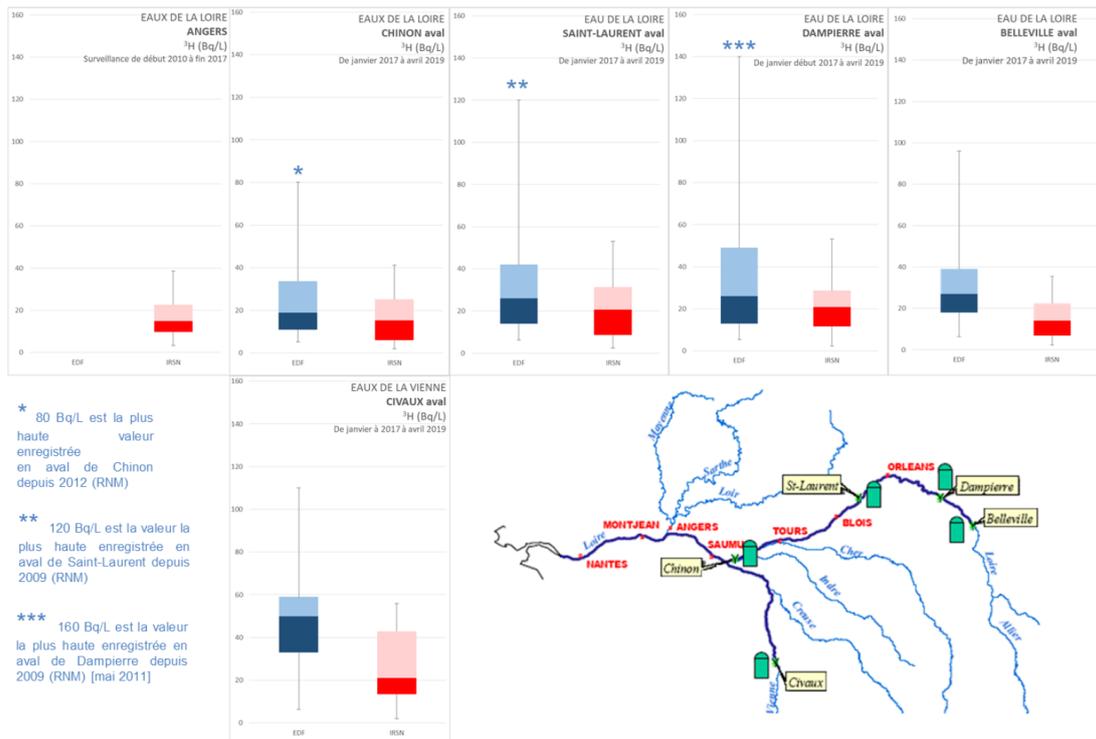


Figure 1 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire et de la Vienne mesurées par les systèmes de surveillance de l'IRSN et d'EDF entre janvier 2017 et avril 2019.

Les niveaux de la station d'Angers de l'IRSN portent sur la période 2010-2017. Les différences entre les mesures de l'IRSN et celles d'EDF proviennent du fait que les premières correspondent à des moyennes mensuelles et les secondes, à des mesures réalisées sur des prélèvements horaires au moment des rejets et des aliquotes journalières.

¹ Les investigations menées par l'IRSN ont fait l'objet de trois notes d'information, publiées sur son site internet (www.irsn.fr) les 20 juin 2019, 19 juillet 2019 et 17 octobre 2019 (www.irsn.fr). L'ASN a rendu compte des diverses investigations menées et actions engagées par des communiqués de presse publiés les 19 juin 2019, 17 octobre 2019 et 20 octobre 2020 sur son site internet (www.asn.fr).

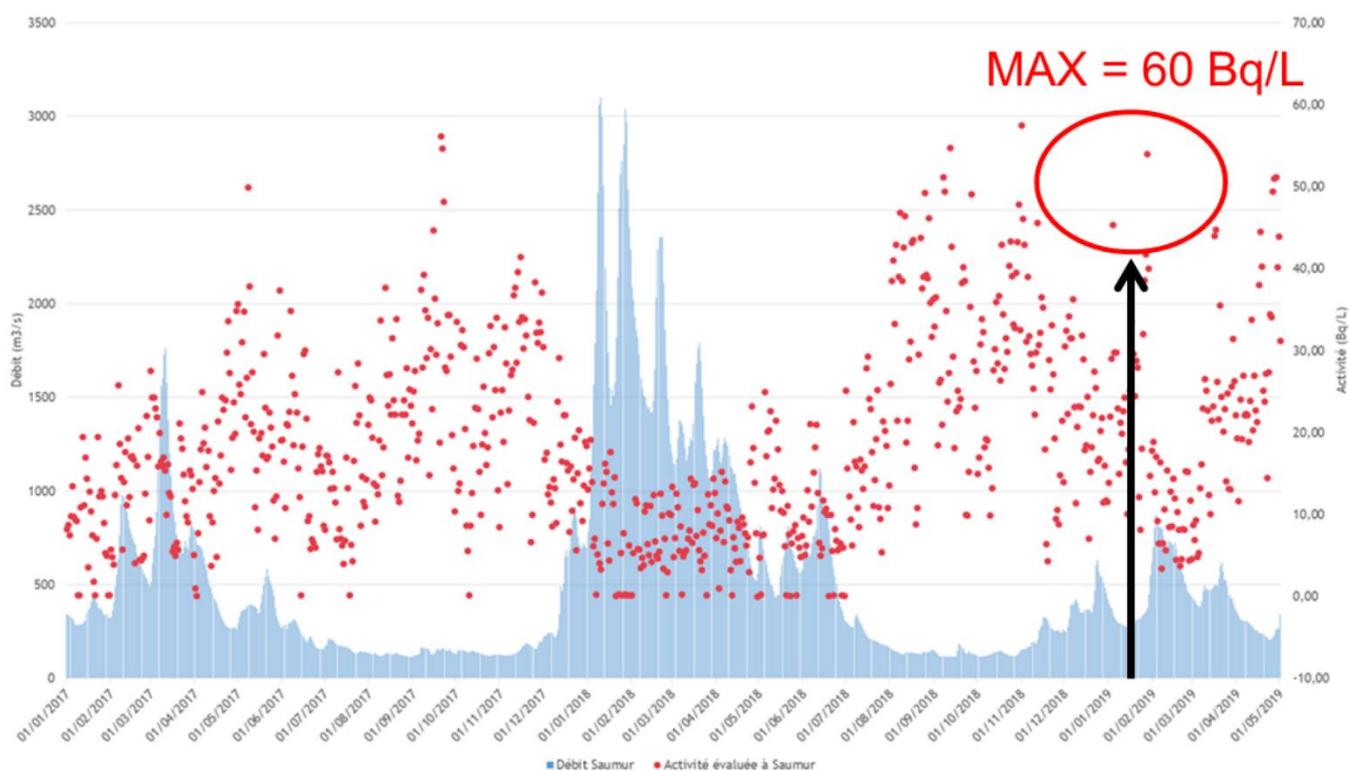


Figure 2 : Estimation des niveaux de tritium attendus à Saumur à partir des mesures de la surveillance effectuées dans la Loire et la Vienne

Par ailleurs, le 21 janvier 2019, la concentration en tritium dans la Loire mesurée par EDF à la station multi-paramètres (SMP) aval du CNPE de Chinon et déclarée au RNM était de $32,8 \pm 7,4$ Bq/L. Cette valeur est effectuée sur un échantillon résultant du regroupement de 24 prélèvements ponctuels réalisés toutes les heures. La concentration en tritium déclarée par EDF à mi-rejet² (prélèvement horaire correspondant) le 20 janvier 2022 est de $27,1 \pm 7,1$ Bq/L.

1.2 ESTIMATION PAR MODELISATION DE LA CONCENTRATION EN TRITIUM DANS LA LOIRE A SAUMUR LE 21 JANVIER 2019

L'IRSN a ensuite procédé à une estimation de la concentration en tritium attendue à Saumur en janvier 2019 par modélisation. Cette modélisation du transfert du tritium dans la Loire a été réalisée à l'aide du logiciel CASTEAUR, avec une hypothèse de « bon mélange » et à partir des données de rejets déclarés par EDF à l'ASN pour l'ensemble des CNPE EDF du bassin de la Loire et des débits de la Loire et de la Vienne extraits de la base de données Hydro.

Ces calculs ont permis d'estimer une concentration maximale en tritium dans la Loire à Saumur fin janvier 2019 de l'ordre de 60 Bq/L (Figure 3) ne permettant donc pas de reproduire, en faisant l'hypothèse d'un bon mélange³, la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019.

² Prélèvement à mi-rejet : prélèvement effectué dans le milieu récepteur à l'instant où la moitié du volume des effluents rejetés considérés a atteint la station multi-paramètres aval pour les sites en bord de rivière.

³ Dans laquelle la concentration en tritium est homogène.

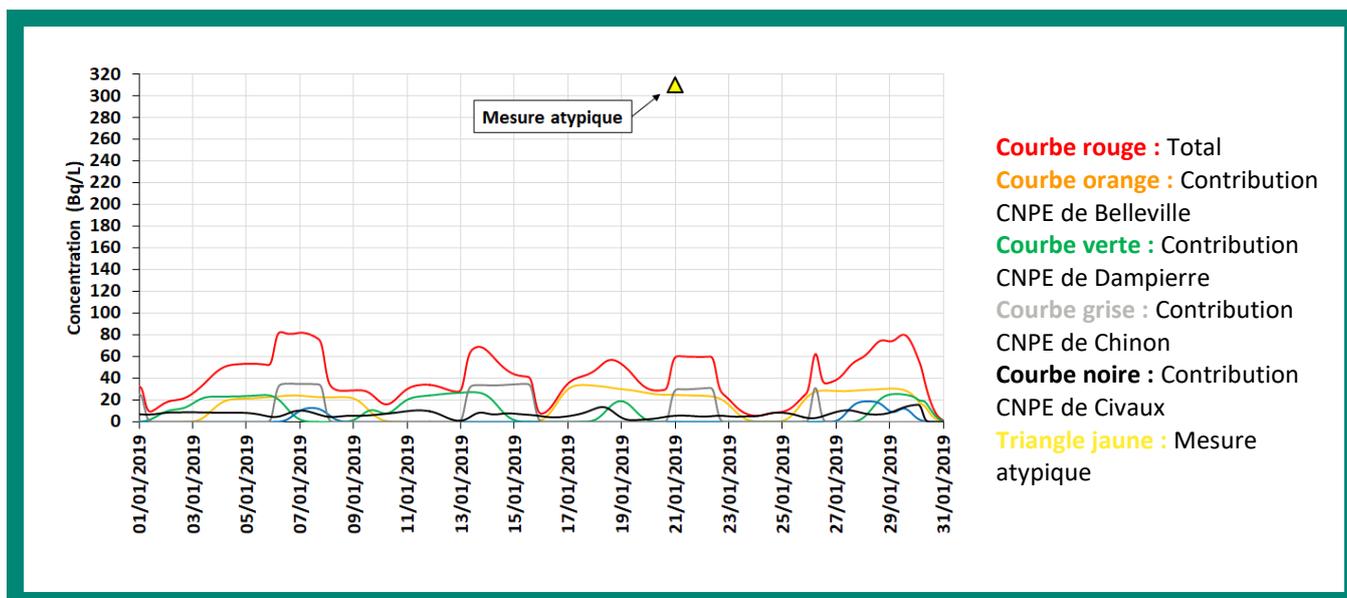


Figure 3 : Concentrations en tritium dans la Loire à Saumur estimées (à l'aide du logiciel CASTEAUR) entre le 1^{er} et le 31 janvier 2019, sur la base des rejets déclarés des CNPE EDF du bassin versant de la Loire et de la Vienne, sous hypothèse de bon mélange desdits rejets.

Pour atteindre un niveau de 310 Bq/L en condition de bon mélange, il faudrait soit la superposition simultanée d'une dizaine de panaches de rejets, ce qui est impossible au regard du nombre de CNPE du bassin de la Loire, soit l'occurrence d'un événement non déclaré et non détecté d'une amplitude dix fois plus importante que celle des rejets de routine.

Cette première phase de l'étude a également permis d'identifier **que le prélèvement du 21 janvier 2019 a vraisemblablement été réalisé pendant le passage du panache d'un rejet du CNPE de Chinon.**

COMPARAISON DES CONCENTRATIONS EN TRITIUM DANS LA LOIRE MODELISEES PAR LE CODE CASTEAUR AVEC LES MESURES DE LA SURVEILLANCE REGLEMENTAIRE

En complément des premiers calculs, l'IRSN a étudié plus en détail la propagation fluviale des rejets de tritium des CNPE du bassin de la Loire et de la Vienne à partir du croisement des données de la surveillance à l'aval des CNPE et d'une modélisation monodimensionnelle avec le code CASTEAUR.

La Figure 4 montre que, lors des rejets du CNPE de Chinon, les mesures de concentrations en tritium réalisées à la SMP (point rouges) sont significativement inférieures aux concentrations estimées par la modélisation sous hypothèse de "bon mélange" (courbe rouge) et qu'elles sont représentatives des conditions de concentrations à l'amont du CNPE de Chinon.

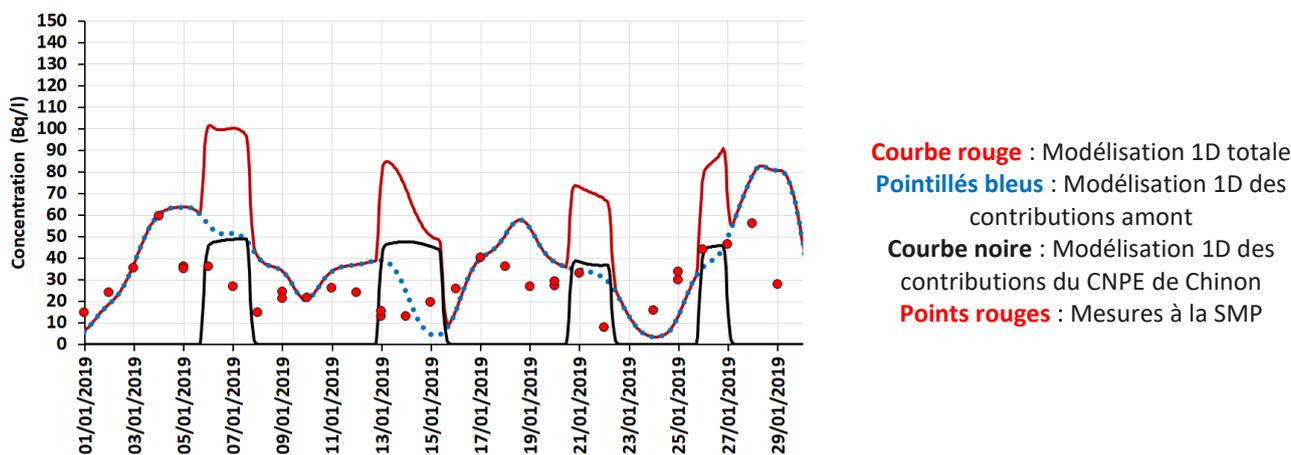


Figure 4 : Comparaison des modélisations 1D (réalisées avec le code CASTEAUR) et des données de la surveillance aval d'EDF au niveau de la SMP aval du CNPE de Chinon pour le mois de janvier 2019

Dans une seconde phase, la même étude a été menée sur une période plus longue, de mai 2018 à mai 2019, afin de tenter de mettre en évidence, de manière plus générale, les conditions dans lesquelles des niveaux élevés de tritium pouvaient être détectés en aval des cinq CNPE du bassin versant. **Cette seconde phase de l'étude confirme que les rejets du CNPE de Chinon peuvent ne pas être homogènes au niveau de sa station multi-paramètres (SMP) aval située environ 6 km en aval du CNPE. Elle montre également que les mesures effectuées par l'ACRO à Saumur sur cette période sont en bon accord avec les valeurs attendues à l'exception de la mesure du 21 janvier 2019.**

Cette étude a donné lieu au rapport IRSN/PSE-ENV/2020-00105 adressé à l'ASN et aux parties prenantes (Cli, élus locaux, association, exploitant) le 1^{er} octobre 2020 et publié sur le site internet de l'IRSN (www.irsn.fr).

A ce stade des investigations, l'IRSN indiquait que l'homogénéisation incomplète des rejets du CNPE de Chinon était l'hypothèse la plus probable pour expliquer la valeur mesurée par l'ACRO le 21 janvier 2019 à Saumur.

CONCLUSIONS DES PREMIERS TRAVAUX

En octobre 2020, l'IRSN concluait de ces premiers travaux que l'hypothèse d'un mélange imparfait des rejets de la centrale de Chinon, entraînant une hétérogénéité de distribution du tritium dans le lit du fleuve sur de longues distances, du fait de conditions hydrauliques particulières, méritait d'être approfondie par une étude sur le terrain.

1.3 LANCEMENT D'UNE CAMPAGNE DE MESURE DU TRITIUM DANS LA LOIRE

L'IRSN et l'ASN ont donc décidé de réaliser une campagne de mesures spécifique (prélèvements à haute fréquence – 7 par jour en 5 points différents – à Saumur) afin d'étudier la reproductibilité de la mesure anormalement élevée de tritium dans la Loire au pont Cessart à Saumur, dans des conditions les plus proches possibles de celles observées en janvier 2019.

Le lancement de cette campagne, qui s'est déroulée sur 5 mois entre novembre 2020 et avril 2021, a fait l'objet le 19 octobre 2020 d'une réunion d'information rassemblant les parties prenantes intéressées (Cli, élus locaux, associations, exploitant des centrales nucléaires).

Cette campagne de mesure avait également pour objectif d'améliorer la compréhension de la dynamique de dispersion du tritium entre le CNPE de Chinon et Saumur. Aussi, parallèlement aux mesures acquises sur le terrain dans le cadre de cette étude, des modélisations (1D et 2D) des concentrations en tritium de la Loire ont été réalisées, à partir des données des rejets déclarés par EDF et des données hydrauliques des cours d'eau sur la période considérée. Les concentrations en tritium issues des modélisations ont été comparées aux mesures des prélèvements réalisés pendant la campagne aux points de prélèvement du pont Cessart à Saumur et aux mesures de surveillance de l'environnement réalisées à la SMP 6 km en aval de Chinon.

Le troisième objectif de cette étude était d'en partager les enseignements avec les parties prenantes. Ainsi, à la demande de la Cli de Chinon, un Comité de suivi de cette étude rassemblant les parties prenantes intéressées, a été mis en place. Au cours de quatre réunions spécifiques de ce Comité, l'IRSN a présenté les résultats de cette étude au fur et à mesure de leur acquisition.

1.4 MESURES REALISEES PAR LES ASSOCIATIONS DANS LA LOIRE ET LA VIENNE

La mesure à 310 Bq/L en tritium dans la Loire à Saumur du 21 janvier 2019

Plusieurs associations du bassin de la Loire réunies dans le Collectif Loire Vienne Zéro Nucléaire⁴ ont mis en place en 2017, avec le laboratoire indépendant de l'ACRO, un suivi de la radioactivité rejetée dans la Loire et la Vienne par les centrales nucléaires de Belleville, Dampierre, St-Laurent, Chinon et Civaux.

Le collectif et l'ACRO précisent que : « ces analyses, réalisées sur les échantillons de l'environnement (sédiments, végétaux, eaux douces et eaux potables), visent à mettre en évidence d'une part des éléments radioactifs émetteurs gamma comme le césium-137 dans les échantillons solides, et le tritium dans les échantillons d'eau ».

Un rapport faisant un premier bilan de ce suivi a été publié le 17 juin 2019 par l'ACRO (rapport RAP190530(01)-OCR_LoireetVienne-v1.0).

Ce rapport indique notamment que « sur les portions de Loire et de Vienne étudiées, du tritium est mis en évidence sur la quasi-totalité des sites de prélèvements et sur l'ensemble des campagnes de prélèvements conduites entre décembre 2017 et mai 2019. Ainsi, sur la Loire, le tritium est présent sur près de 400 km, entre Dampierre-en-Burly et Nantes. **Le 21 janvier 2019, une concentration de 310 Bq/L de tritium a été relevée dans la Loire à Saumur** ».

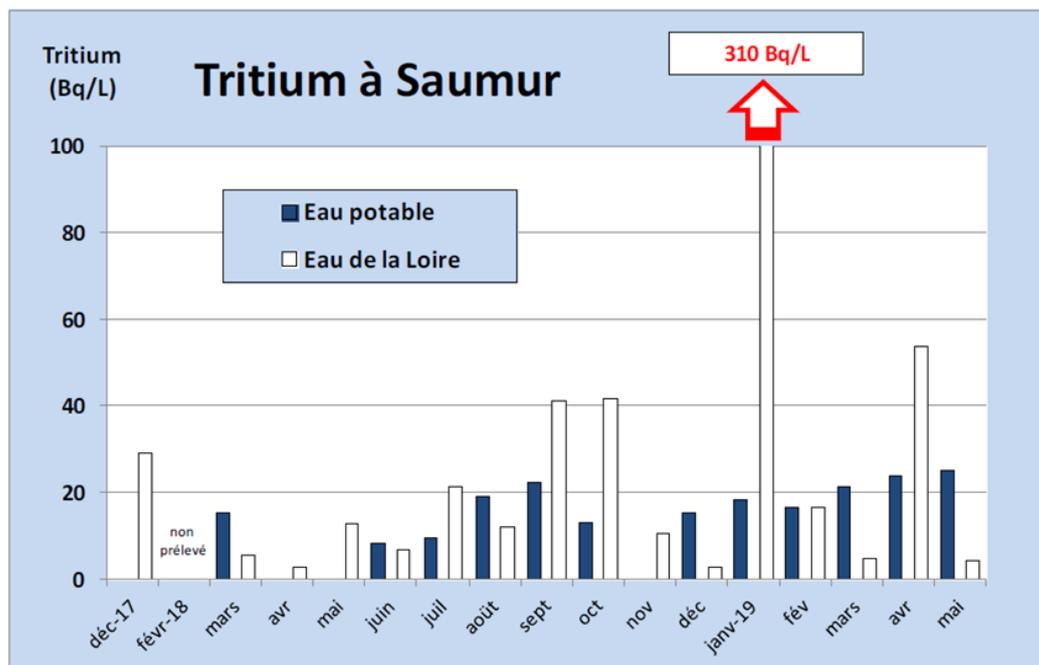


Figure 5 : Concentrations en tritium mesurées par l'ACRO à Saumur, dans les eaux potables et dans les eaux de la Loire entre décembre 2017 et mai 2019

Cette concentration étant très supérieure aux niveaux en tritium mesurés habituellement dans la Loire, les associations demandent que « [...] cette valeur anormalement élevée par rapport à la contamination généralement observée soit expliquée par EDF et les autorités [...] » en questionnant sur son origine : « Est-ce dû à un rejet plus important ou à un incident ? »

⁴ Composé des associations Sortir du Nucléaire 49 et Sortir du Nucléaire Loire et Vienne

À la suite de cette publication, l'IRSN et l'ASN ont pris contact avec l'ACRO pour recueillir des informations techniques notamment sur cette campagne de prélèvement ainsi que sur le lieu et le processus de prélèvement qui avait conduit à cette mesure atypique.

L'ACRO a répondu à l'ASN dans un courrier du 28 août 2019 en indiquant que :

- ces prélèvements s'inscrivaient dans « un plan d'échantillonnage élaboré en concertation entre l'ACRO et le Collectif, de manière à établir un programme complet, dans lequel sont précisées toutes les informations nécessaires à une conduite optimale de la surveillance radiologique de l'environnement (lieux de prélèvement, types d'échantillons à prélever, quantité, etc.) » ;
- « l'ACRO a réalisé deux sessions de formation aux prélèvements auprès des bénévoles du collectif, le 16 septembre 2017 à Saumur et le 15 septembre 2019 à Montsoreau » ;
- « ce sont les bénévoles du réseau Sortir du Nucléaire qui réalisent les prélèvements, puis qui expédient les échantillons au laboratoire de l'ACRO par voie postale pour la conduite des analyses de radioactivité (tritium dans l'eau et radionucléides émetteurs gamma dans les échantillons solides). Les conditions de prélèvement, de conditionnement et d'expédition des échantillons sont ainsi réalisées selon nos recommandations et procédures qualité ».

Concernant le prélèvement du 21 janvier 2019, l'ACRO décrivait dans un échange de mail avec l'IRSN le processus de prélèvement à Saumur :

« **Le prélèvement de janvier 2019 a été réalisé depuis le milieu du pont Cessart, d'autres ont été réalisés depuis la rive droite depuis le même pont.**

Le prélèvement se fait depuis le milieu du pont Cessart (flèche rouge sur la figure 4). Je me place sur le trottoir ; selon mon GPS les coordonnées géographiques seraient : N 47° 15.732' — O 00°04.542'. Le dispositif est une bouteille plastique de 50 cl attachée sur une sangle avec de l'adhésif avec un poids en acier en bout de sangle pour permettre au dispositif de s'enfoncer dans l'eau. Le prélèvement se fait entre deux eaux par plongée de la bouteille et non purement en surface. Le diamètre de son orifice – 3 cm – occasionne un remplissage en 15 à 20 secondes, le temps de la descente. »

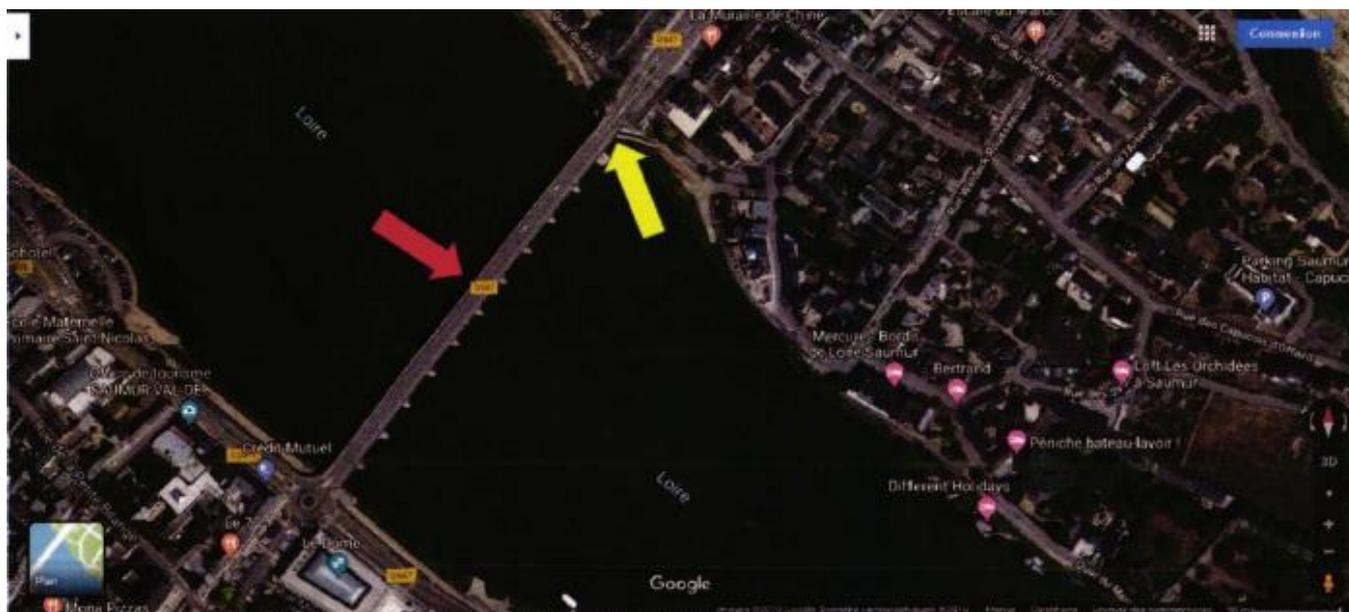


Figure 6 : Point de prélèvement (flèche rouge) du 21 janvier 2019 indiqué par le Collectif

Mesures réalisées par l'ACRO au pont Cessart

Le 6 octobre 2020, l'ACRO a publié un nouveau rapport « Surveillance radiologique de l'environnement autour des installations nucléaires de la Loire et de la Vienne – Bilan 2018 / 2020 » faisant la synthèse des résultats des mesures en tritium des échantillons collectés entre décembre 2017 et août 2020 (Figure 7).

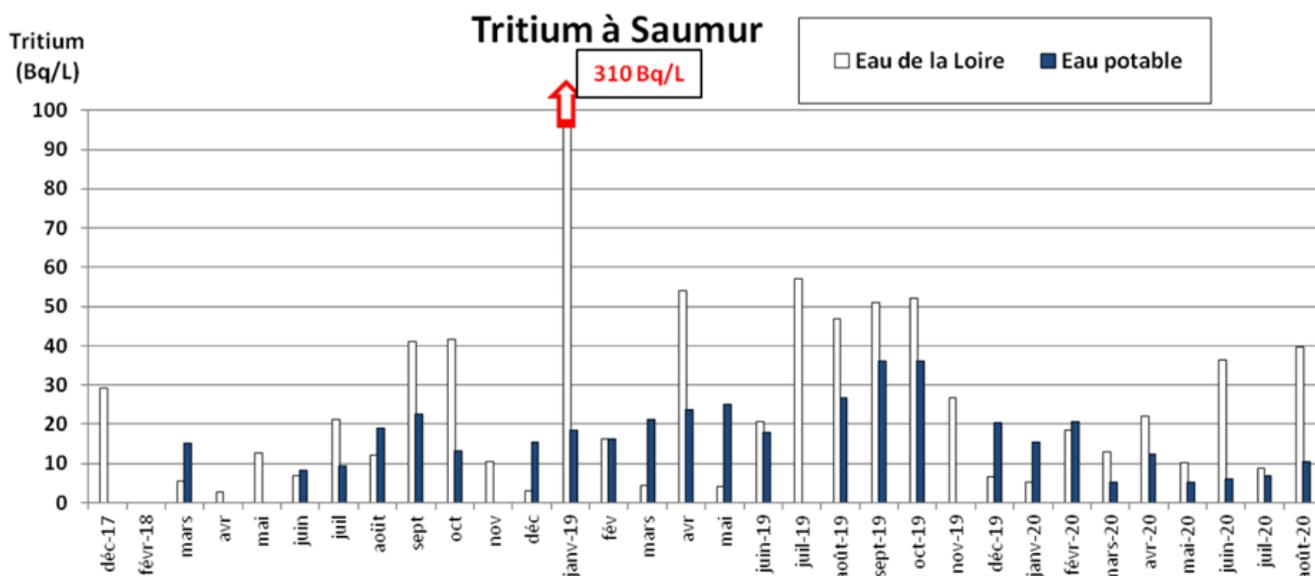


Figure 7 : Concentrations en tritium mesurées par l'ACRO à Saumur, dans les eaux potables et dans les eaux de la Loire entre décembre 2017 et août 2020

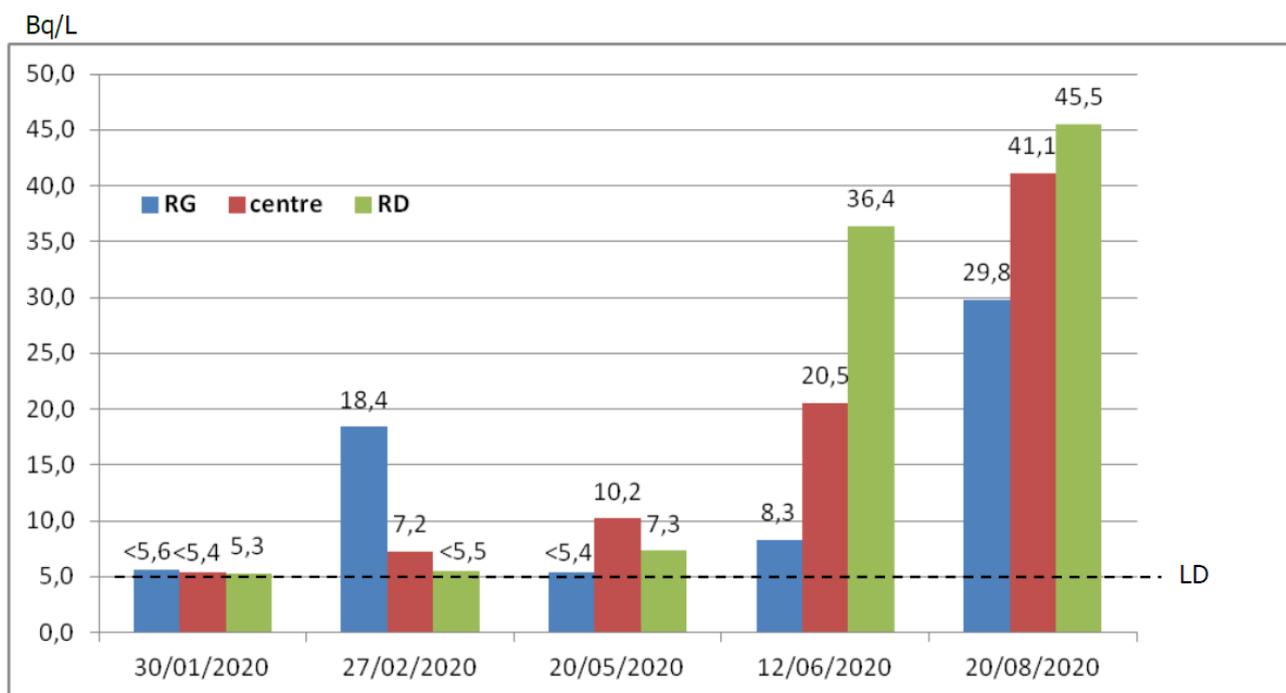


Figure 8 : Concentrations en tritium mesurées par l'ACRO à Saumur, dans les eaux de la Loire entre janvier 2020 et août 2020 (RG = Rive gauche, RD = Rive droite)

Ce rapport présente notamment de nouvelles mesures effectuées au niveau du **pont Cessart à Saumur en 2020 (Figure 8) qui mettent en évidence un gradient de la concentration en tritium suivant le transect du pont**. Le rapport indique que « [...] selon les prélèvements, des maxima de concentrations peuvent être retrouvés sur la rive gauche ou la rive droite. Ce constat montre que le mauvais mélange n'est pas exceptionnel à Saumur ».

L'ACRO explique que : « le 27/02/2020, la concentration en tritium est plus élevée sur la rive gauche, ce qui suggère un apport des eaux de la Vienne et une absence de rejet sur la Loire. Les données EDF sur la Vienne confirment une contamination quotidienne de ce cours en février 2020.

Les 12/06/2020 et 20/08/2020, la concentration en tritium rive droite est beaucoup plus élevée que celle rive gauche : il y a fort probablement eu des rejets de la centrale de Chinon ces deux jours-là. Comme il n'y a pas eu de rejets en tritium dans les eaux de la Vienne dans les jours qui précèdent ces deux dates de prélèvement, la contamination en rive gauche montre que les eaux de la Loire se sont partiellement mélangées à celles de la Vienne.

Enfin, le 20/05/2020, la contamination en tritium relevée au centre du pont et en rive droite devait probablement venir de centrales situées en amont de Chinon. Sur la rive gauche influencée par la Vienne, aucun tritium n'est mis en évidence, démontrant l'absence d'apport en provenance de Civaux. Ceci est confirmé par les relevés d'EDF dans les jours qui précèdent cette date. »

L'ACRO conclut dans son communiqué que : « les investigations supplémentaires que nous avons effectuées montrent qu'il n'y a pas de « bon mélange » à Saumur [...]. La contamination en tritium sur la rive gauche est encore influencée par les eaux de la Vienne et celle en rive droite, par les eaux de la Loire ».

1.5 INVESTIGATIONS PRELIMINAIRES POUR IDENTIFIER LES ORIGINES POSSIBLES DE LA MESURE DU 21 JANVIER 2019

En préalable au lancement de la campagne de mesure du tritium dans la Loire au pont Cessart en novembre 2020, l'IRSN et l'ASN ont étudié plusieurs pistes pour tenter d'expliquer cette mesure atypique.

Les investigations ont porté sur :

1. l'hypothèse d'un rejet exceptionnel/non concerté du CNPE de Chinon ou d'un ou plusieurs CNPE situés en amont sur la Loire et/ou la Vienne ;
2. l'hypothèse d'une autre source de tritium ;
3. une analyse du processus de prélèvement et de mesure du 21 janvier 2019 ;
4. l'hypothèse d'une hétérogénéité des concentrations en tritium dans la Loire sur des longues distances, provenant d'un mélange imparfait des rejets du CNPE de Chinon dans le milieu, du fait de conditions hydrauliques particulières, voire d'un phénomène de stratification thermique (verticale) des rejets de Chinon.

Un rejet exceptionnel / non concerté du CNPE de Chinon ou d'un ou plusieurs CNPE situés en amont sur la Loire et/ou la Vienne ?

Dans sa note d'information du 19/06/2019, l'ASN indique « ne pas avoir connaissance d'événements anormaux à cette période. En particulier, aucun exploitant nucléaire n'a déclaré d'événement significatif relatif à ses rejets radioactifs. À titre de confirmation, l'ASN a demandé aux exploitants géographiquement concernés s'ils avaient connaissance d'une anomalie de gestion de leurs effluents durant cette période. »

Dans sa note d'information du 17/10/2019, l'ASN indique « avoir mené, le 21 juin 2019, une inspection de la centrale nucléaire de Chinon afin de contrôler les dispositions de maîtrise des rejets d'effluents liquides prises par l'exploitant, en particulier pour ce qui concerne les opérations de rejets effectuées dans la période précédant le prélèvement ayant donné lieu à la valeur anormalement élevée. Lors de cette inspection, aucune anomalie importante susceptible d'être à l'origine d'un rejet non maîtrisé n'a été détectée.

L'ASN a également analysé une nouvelle fois les registres réglementaires remis par EDF ; elle n'a relevé aucune anomalie concernant les modalités de rejets des centrales concernées sur la période considérée. Les calculs de dilution font état d'une concentration moyenne de 60 à 80 Bq/L en aval de la confluence Vienne/Loire le 21 janvier 2019. »

La lettre de suite de l'inspection du 21 juin 2019 (réf. CODEP-OLS-2029-028223) est disponible sur le site de l'ASN (www.asn.fr).

Le 25 septembre 2020, EDF a déclaré à l'ASN un événement significatif pour l'environnement (ESE) relatif à un rejet non maîtrisé d'effluents liquides (concentration en tritium rejetée 4 fois plus importante que la concentration prévue), effectué entre le 19 et le 21 septembre 2020 par le CNPE Chinon. Cet événement a conduit l'IRSN à effectuer, à la demande de membres du Comité de suivi, des modélisations pour évaluer les conséquences d'un hypothétique rejet non maîtrisé en janvier 2019 dans les mêmes conditions que celui de septembre 2020, hypothèse invalidée par l'inspection de l'ASN du 21 juin 2019 (voir chapitre 6) .

Une autre source de tritium

L'ASN a interrogé les autres exploitants d'installations industrielles détentrices de sources de tritium et échangé avec son homologue pour la Défense (ASND) et la Direction Générale de la Santé.

L'Autorité de Sûreté Nucléaire de Défense lui a répondu qu'aucun événement anormal, susceptible d'expliquer cette mesure atypique, ne lui avait été signalé dans les installations nucléaires de base secrètes (INBS).

Les recherches menées par les divisions territoriales concernées de l'ASN et la Direction du transport et des sources de l'ASN n'ont mis en évidence aucun événement anormal, chez les détenteurs de source de tritium autorisés au titre des ICPE ou du Code de la Santé publique, susceptible d'expliquer cette mesure atypique.

Les contacts pris avec la Direction Générale de la Santé, les Agences Régionales de Santé et la préfecture de Loire-Atlantique n'ont montré aucun dépassement de la valeur guide de 100 Bq/L en tritium dans les analyses d'eau de consommation humaine.

Au vu de ces éléments, l'hypothèse d'une autre source de tritium que les CNPE du bassin de la Loire et de la Vienne n'a pas été retenue pour expliquer la mesure atypique du 21 janvier 2019.

Une analyse du processus de prélèvement et de mesure

L'IRSN et l'ASN ont pris contact avec l'ACRO pour recueillir des informations techniques sur cette campagne de prélèvement et notamment sur le lieu et le processus de prélèvement qui avait conduit à cette mesure atypique de 310 Bq/L.

L'ACRO a répondu par courrier adressé à l'ASN du 28 août 2019, donnant des précisions sur la méthode de prélèvement d'eau dans la Loire suivie par les préleveurs ainsi que sur les formations idoines dispensées, sur le conditionnement et le transport d'échantillon, sur la gestion des risques de contamination croisée d'échantillons dans le laboratoire, sur le protocole de mesure de la concentration en tritium dans un échantillon d'eau de l'environnement par scintillation liquide ainsi que sur les normes suivies par le laboratoire.

Concernant le prélèvement du 21 janvier 2019, les éléments techniques fournis par l'ACRO à l'IRSN sont décrits au chapitre 1.4.

Au plan métrologique, le laboratoire de l'ACRO dispose d'un agrément de l'Autorité de Sûreté Nucléaire pour la mesure de la radioactivité de l'environnement pour la mesure du tritium dans l'eau. Ce laboratoire a fait l'objet d'une visite, par l'ASN, de conformité de ses pratiques du laboratoire avec les dispositions de la Norme NF EN ISO/IEC 17025 le 15 décembre 2020 par l'ASN. Le lettre de suite de cette visite de contrôle (réf. CODEP-CAE-2021-002402) est disponible sur le site de l'ASN (www.asn.fr).

L'analyse des informations fournies concernant le prélèvement et la mesure n'a pas mis en évidence d'éléments susceptibles d'expliquer la mesure atypique du 21 janvier 2019.

CONCLUSIONS DES INVESTIGATIONS PRELIMINAIRES

Sur la base des éléments recueillis et analysés par l'ASN et l'IRSN, l'hypothèse la plus probable pour expliquer la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019 est celle d'une hétérogénéité des concentrations en tritium dans la Loire sur des longues distances, provenant d'un mélange imparfait des rejets du CNPE de Chinon dans le milieu, du fait de conditions hydrauliques particulières.

Cette hypothèse a fait l'objet d'une étude approfondie menée par l'IRSN dont le déroulement, les résultats et les conclusions sont présentés dans ce rapport.

1.6 LES CNPE DU BASSIN VERSANT ET LEURS REJETS

Cinq CNPE sont implantés dans le bassin versant de la Loire, sur la Vienne ou la Loire, tous situés en amont de la ville de Saumur (Figure 9). Il s'agit de :

- Civaux sur la Vienne (département de la Vienne, avec 2 tranches de 1450 MWe) ;
- Belleville-sur-Loire (département du Cher, avec 2 tranches de 1300 MWe), Dampierre-en-Burly (département du Loiret, avec 4 tranches de 900 MWe), Saint Laurent des Eaux (département du Loiret et Cher, avec 2 tranches de 900 MWe) et Chinon (département d'Indre-et-Loire, avec 4 tranches de 900 MWe) sur la Loire, d'amont en aval.

Chacun des CNPE rejette des effluents liquides dans le cours d'eau au moyen d'une conduite de rejet multipores, aussi appelée « clarinette ». Ce dispositif sert à la fois au rejet des eaux de refroidissement et aux rejets radioactifs des réservoirs d'effluents après contrôles. Il s'agit d'une conduite installée en travers de l'écoulement du cours d'eau, munie de plusieurs buses de rejet, dont l'objectif est d'améliorer le mélange des rejets dans le cours d'eau. Sa longueur ainsi que le nombre de buses varie d'un CNPE à un autre ; la clarinette de Chinon est ainsi équipée de 11 buses de rejet sur environ 50 mètres.

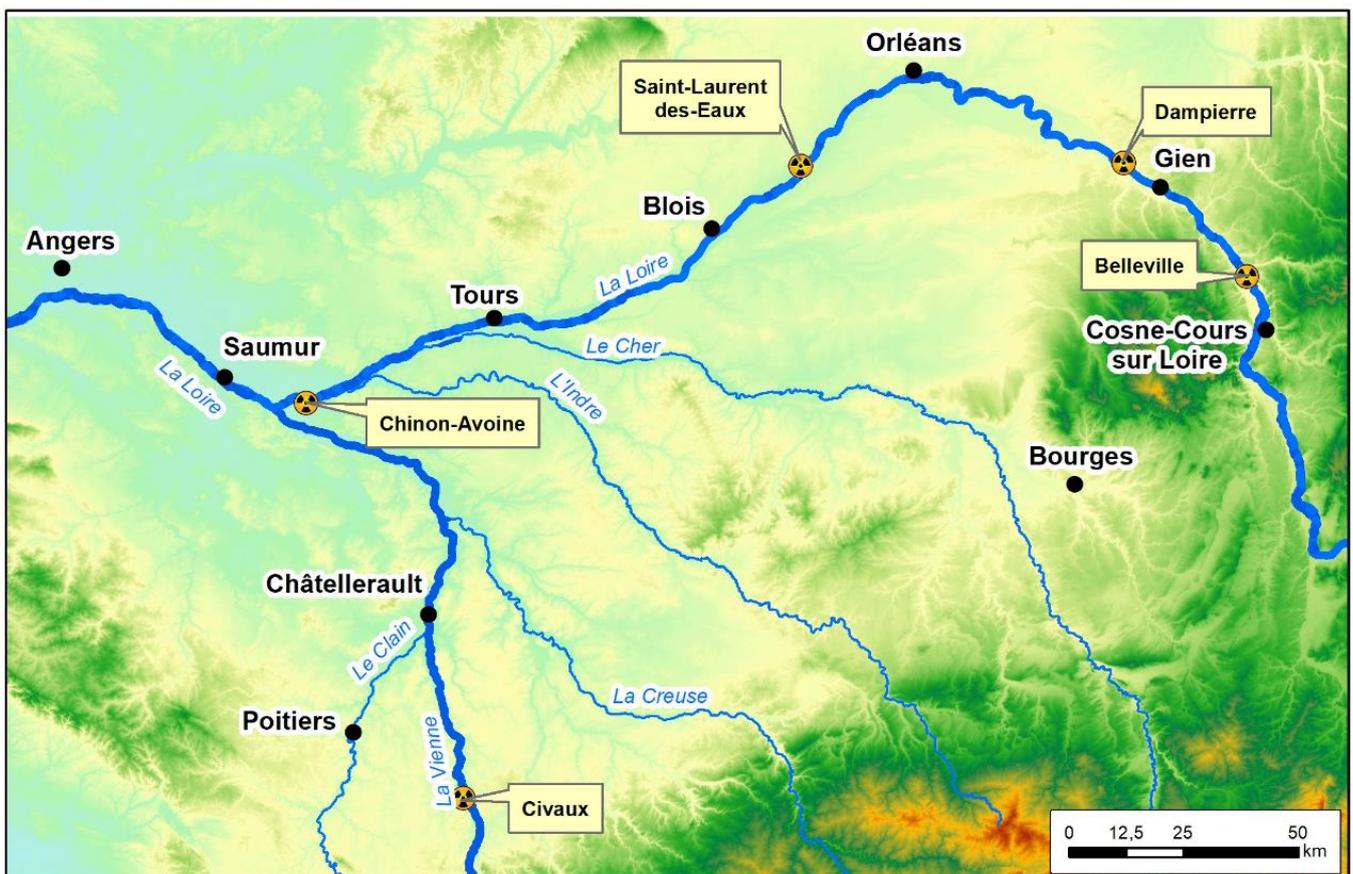


Figure 9 : Emplacement des cinq CNPE du bassin versant de la Loire situés à l'amont de la ville de Saumur, sur la Loire (Belleville, Dampierre, Saint Laurent, Chinon) et la Vienne (Civaux)

1.7 LA REGLEMENTATION DES REJETS

Les prescriptions générales en matière de surveillance des rejets et de l'environnement sont définies par la décision 2013-DC-0360 modifiée de l'ASN, et complétées, dans le cas des réacteurs EDF, par la décision 2017-DC-0588.

Les rejets des CNPE de la Loire sont encadrés pour chaque site par une décision fixant les limites de rejet dans l'environnement des effluents (dite décision « limites »), homologuée par un arrêté, et une décision fixant les prescriptions relatives aux modalités de prélèvement et de consommation d'eau, de rejet d'effluents et de surveillance de l'environnement (dite décision « modalités »), c'est-à-dire les conditions dans lesquelles l'exploitant peut procéder aux prélèvements et rejets dans l'environnement, et le programme de surveillance réglementaire de l'environnement du CNPE. Le tableau ci-dessous rappelle les décisions ASN applicables aux centrales de la Loire et de la Vienne :

Tableau 1 : Décisions ASN applicables aux CNPE de la Loire et de la Vienne

CNPE	Décision « limites »	Arrêté d'homologation	Décision « modalités »
Belleville-sur-Loire	2014-DC-0414	Arrêté du 04/03/2014	2014-DC-0413
Dampierre-en-Burly	2011-DC-0210	Arrêté du 06/05/2011	2011-DC-0211
Saint-Laurent-des-Eaux	2015-DC-0498	Arrêté du 19/03/2015	2015-DC-0499
Chinon	2015-DC-0527	Arrêté du 27/11/2015	2015-DC-0528
Civaux	2009-DC-0139	Arrêté du 23/06/2009	2009-DC-0138

La surveillance des rejets liquides inclut des contrôles permettant de caractériser les effluents radioactifs avant leur émission vers le cours d'eau. Avant chaque opération de rejet, le contenu des cuves recueillant les effluents est échantillonné afin de déterminer la concentration des différents radionucléides et d'assurer que celle-ci respecte les limites imposées ce qui peut, si ce n'est le cas, nécessiter un traitement préalable avant rejet. Ces analyses s'accompagnent également de mesures des paramètres physico-chimiques, comme le pH et la température, la demande chimique en oxygène (DCO) ou la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO5). Un contrôle gamma global par deux chaînes indépendantes est également réalisé « en ligne » lors du rejet, avec des alertes permettant d'interrompre automatiquement le rejet en cas de dépassement du seuil de 40 000 Bq/L.

L'ASN s'assure lors d'inspections dédiées du bon respect des procédures et du contrôle des équipements intervenant dans le processus de rejet. De même, le constat d'une anomalie ou d'un écart significatif vis-à-vis du référentiel de gestion doit faire l'objet d'un signalement à l'ASN.

L'effluent est mélangé avant rejet avec les eaux provenant de la station de déminéralisation et les eaux des circuits de refroidissement afin d'assurer une dilution d'un facteur au moins 500.

En amont et aval de l'installation, des stations multi-paramètres (SMP) assurent la mesure des paramètres de l'eau de la rivière.

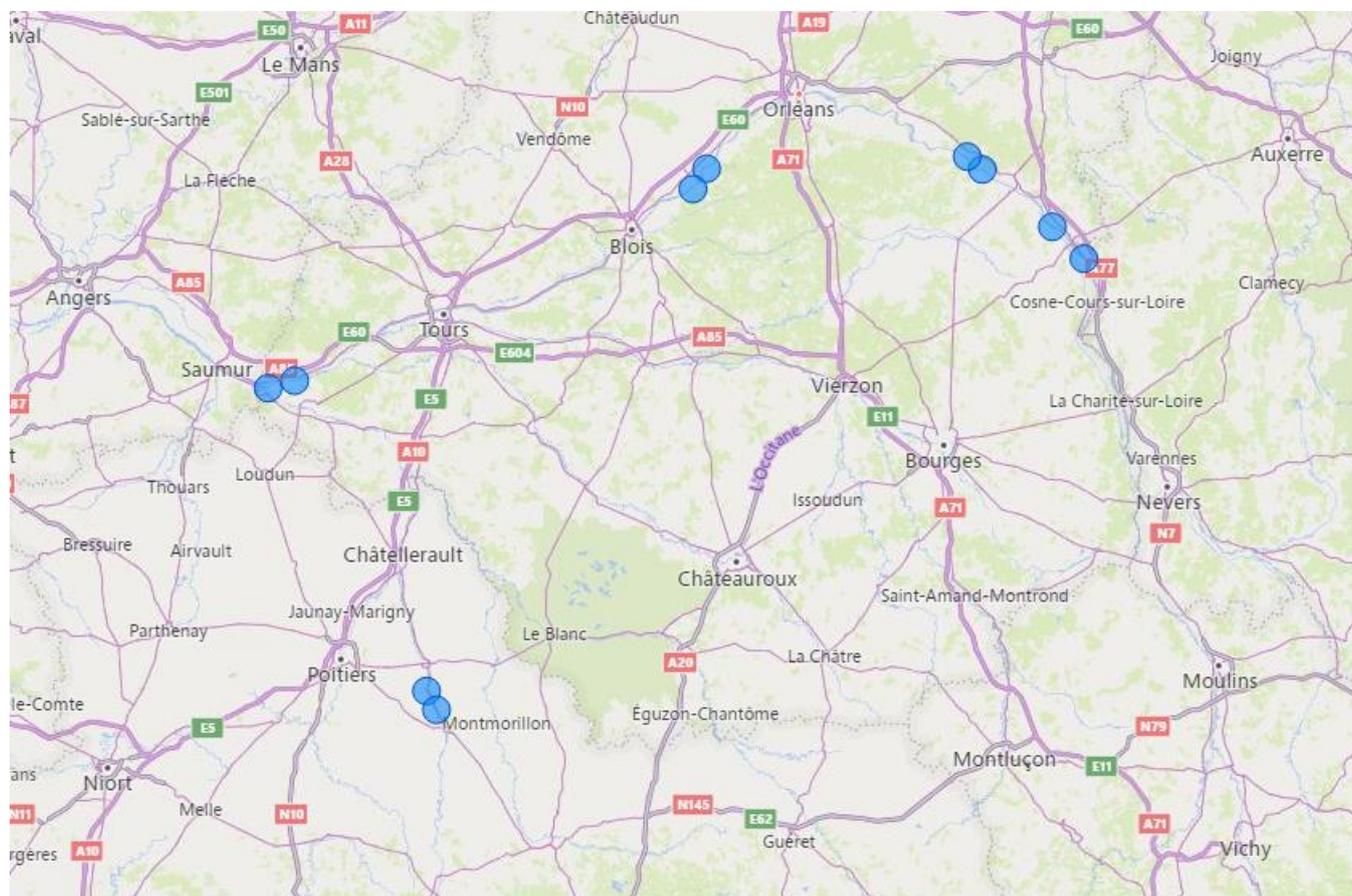


Figure 10 : Positionnement des stations multi-paramètres des CNPE de la Loire et de la Vienne

Des conditions sur les débits du cours d'eau récepteur sont imposées à chaque installation pour pouvoir procéder au rejet (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs de débits du cours d'eau minimales et maximales autorisant un rejet

CNPE	Débit minimal (m ³ /s)	Débit maximal (m ³ /s)	Dispositions complémentaires
Belleville-sur-Loire	30	1500	Lorsque le débit de la Loire est compris entre 30 et 50 m ³ /s, les rejets ne peuvent avoir lieu qu'après information préalable de l'ASN
Dampierre-en-Burly	30	1500	Lorsque le débit de la Loire est compris entre 30 et 60 m ³ /s, les rejets ne peuvent avoir lieu qu'après information préalable de l'ASN
Saint-Laurent-des-Eaux	46	1500	Lorsque le débit de la Loire est compris entre 46 et 60 m ³ /s, les rejets ne peuvent avoir lieu qu'après information préalable de l'ASN
Chinon	54	2000	
Civaux	20 ⁵	400	Lorsque le débit de la Vienne est compris entre 20 et 27 m ³ /s, l'exploitant informe l'ASN et doit réduire sa production d'effluents au strict minimum

Par ailleurs, lorsque le débit de la Loire est inférieur à 60 m³/s à Gien, les rejets liquides sont réalisés en coordination entre les différents CNPE implantés sur la Loire. Ces plages sont complétées par des limites de débit de rejet, c'est-à-dire la concentration maximale rejetée par seconde à l'exutoire (en prenant une moyenne journalière). Pour le tritium, les limites sont fournies dans le Tableau 3 :

Tableau 3 : Limites de débit de rejet pour chaque CNPE de la Loire et la Vienne

CNPE	Limite annuelle de rejet (GBq/an)	Débit d'activité ⁶ maximal (Bq/s)
Belleville-sur-Loire	60 000	
Dampierre-en-Burly	100 000	
Saint-Laurent-des-Eaux	45 000	80 x Débit Loire (en L/s)
Chinon	80 000 ⁷	
Civaux	80 000 à 90 000 ⁸	40 x Débit Vienne (en L/s) si celui-ci est compris entre 10 et 27 m ³ /s 80 x Débit Vienne (en L/s) si celui-ci est compris entre 27 et 400 m ³ /s

En aval de l'installation, la station multi-paramètres aval (SMP) réalise des prélèvements horaires afin d'analyser la concentration de l'eau sous influence des rejets. Une aliquote journalière est systématiquement analysée, ainsi qu'un échantillon « à mi-rejet » lors d'un rejet d'effluents.

⁵ Exceptionnellement, dans le cas d'un étiage prolongé et lorsque la possibilité d'utilisation des réservoirs de santé ne peut plus être employée, le rejet d'un réservoir T d'effluents peut être réalisé – après accord préalable du Directeur Général de l'ASN – lorsque le débit de la Vienne est compris entre 10 et 20 m³/s. L'activité maximale du réservoir est alors limitée à 1 MBq/L en tritium et 25 Bq/L pour la somme des autres radionucléides (hormis le nickel 63 et le carbone 14).

⁶ Concentration exprimée par le terme d'activité (volumique) dans les textes de l'ASN.

⁷ La valeur de 80 000 GBq/an correspond à la limite annuelle pour Chinon B (réacteurs REP en fonctionnement). Le site de Chinon accueille également l'Atelier des matériaux irradiés (AMI) et Chinon A (réacteurs UNGG en démantèlement) avec des limites annuelles en tritium respectivement de 3 GBq/an et 0,93 GBq/an.

⁸ Selon la gestion de combustible retenue.

Le cadre réglementaire prescrit également des limitations quant à l'activité dans le milieu récepteur au niveau de la SMP aval de l'installation :

- l'activité volumique moyenne journalière du tritium (mesurée sur l'aliquote) doit être inférieure à 140 Bq/L en présence de rejets radioactifs et 100 Bq/L en l'absence de rejets radioactifs ;
- l'activité volumique horaire à mi-rejet du tritium doit être inférieure à 280 Bq/L et à 2 Bq/L pour les autres émetteurs β (hormis le potassium 40).

Tableau 4 : Activités volumiques limites prescrites

CNPE	Activité volumique horaire à mi-rejet (Bq/L)		Activité volumique moyenne journalière (Bq/L)	
	Tritium	Emetteurs β (hors ^3H et ^{40}K)	Tritium	Emetteurs β (hors ^3H et ^{40}K)
Belleville-sur-Loire	280	2	140 / 100	-
Dampierre-en-Burly	280	2	140 / 100	-
Saint-Laurent-des-Eaux	280	2	140 / 100	-
Chinon	280	2	140 / 100	-
Civaux	280	2	140 / 100	-

1.8 LA SURVEILLANCE DES REJETS PAR LES CNPE ET PAR L'IRSN

Pour chaque CNPE, la décision ASN prescrit la réalisation de prélèvements d'eau de rivière en amont et en aval du site, au niveau des stations multi-paramètres. La carte ci-dessous présente le positionnement des SMP amont et aval du CNPE de Chinon.

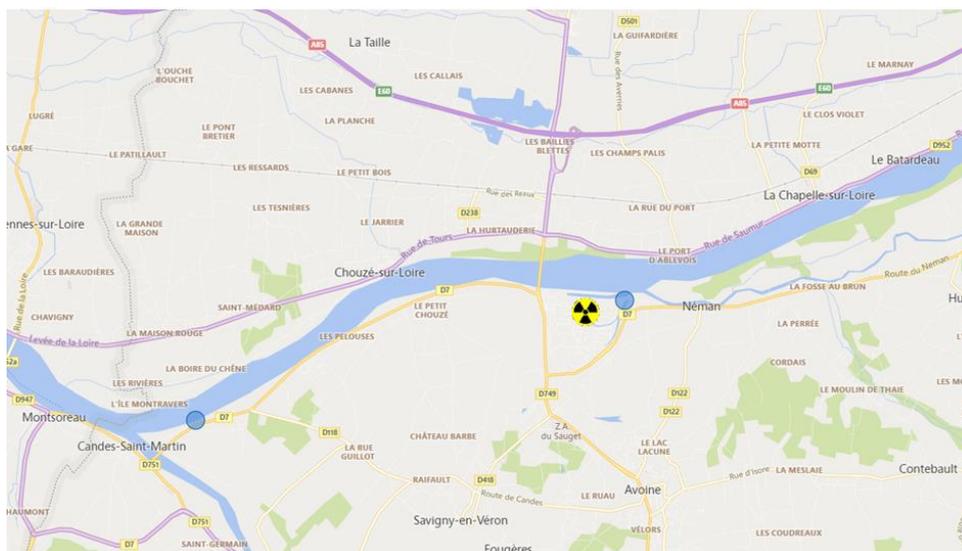


Figure 11 : Positionnement des points de prélèvement d'eau de Loire (SMP) du CNPE de Chinon

Pour le CNPE de Chinon, la décision ASN 2015-DC-0528, stipule que les prélèvements amont doivent être réalisés au niveau du canal d'amenée de la centrale et ceux aval à Candes Saint Martin, en rive gauche de la Loire, avant la confluence avec la Vienne.

A la SMP aval, sur chaque aliquote quotidien constitué à partir des prélèvements horaires, EDF réalise des analyses de tritium. En période de rejet, l'échantillon horaire correspondant au mi-rejet, fait également l'objet d'une analyse de tritium, bêta global et ^{40}K par EDF. Des analyses complémentaires sont exigées en cas de dépassement des niveaux d'activité volumique maximum prescrits (voir Tableau 5).

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des analyses réglementaires, prescrites par l'ASN pour le CNPE de Chinon, réalisées en routine et en cas de dépassement.

Tableau 5 : Prélèvements et mesures relatives à la surveillance des eaux de surface en amont et aval du site de Chinon

Point de prélèvement	Prélèvements règlementaires Analyse - fréquence de prélèvement	Si dépassement des niveaux d'activité maximum prescrits
Station multi-paramètres amont	Prélèvement lors de chaque rejet	³ H sur l'ensemble des échantillons journaliers de la période du rejet
Station multi-paramètres aval	³ H sur un échantillon aliquote quotidien réalisé à partir des prélèvements à fréquence horaire ³ H, bêta global et ⁴⁰ K sur le prélèvement horaire à mi-rejet + bêta global sur les matières en suspension	³ H sur l'ensemble des échantillons horaires de la période du rejet Spectrométrie gamma sur les échantillons concernés par le dépassement

Dans le milieu aquatique, EDF réalise également des prélèvements annuels de sédiments, de végétaux aquatiques et de poissons dans la Loire en amont et en aval du CNPE de Chinon. Les analyses réalisées sur ces matrices sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6 : Analyses réalisées par EDF sur les prélèvements du compartiment aquatiques

Matrices prélevées	Gamma	¹⁴ C	HTO	TOL
Sédiments	X			
Végétaux aquatiques	X	X		
Poissons	X	X	X	X

Dans le cadre de son plan de surveillance, l'IRSN réalise en aval de chaque CNPE au même point qu'EDF (SMP) une mesure de tritium sur un prélèvement aliquote moyen d'eau effectué avec son propre hydrocollecteur. Des prélèvements mensuels de matières en suspension sont également collectés sur cette station et font l'objet d'une mesure par spectrométrie gamma. Des campagnes de pêches sont en outre menées périodiquement afin de réaliser des mesures de tritium organiquement lié (TOL), ¹⁴C et des émetteurs gamma sur les poissons.

REALISATION DE L'ETUDE

2.1 LES OBJECTIFS

OBJECTIFS DE LA CAMPAGNE

La campagne de mesure des concentrations en tritium dans la Loire à Saumur, qui s'est déroulée sur une période de cinq mois (entre novembre 2020 et avril 2021) avait pour objectifs :

- d'étudier la reproductibilité de la mesure anormalement élevée de tritium au pont Cessart dans des conditions proches de celles du prélèvement citoyen de janvier 2019 ;
- de comparer les mesures aux modélisations ;
- d'en partager les enseignements avec les parties prenantes.

Ces objectifs doivent permettre de vérifier si l'hypothèse d'un mélange imparfait des rejets de la centrale de Chinon – entraînant une hétérogénéité des concentrations en tritium dans la Loire sur de longues distances – peut conduire, dans certaines conditions, à mesurer des pics de concentrations en tritium de 310 Bq/L à Saumur.

Après avoir effectué une étude préliminaire sur quelques jours entre le 14 et le 18 septembre 2020, dans une période de rejet du CNPE de Chinon, pour vérifier la faisabilité et la pertinence du protocole envisagé (voir chapitre 2.2), l'IRSN a débuté le 9 novembre 2021, pour une durée de 5 mois, une campagne de prélèvements à haute fréquence à Saumur au niveau du pont Cessart. Les prélèvements ont été analysés dans les laboratoires accrédités COFRAC de l'IRSN situés en région parisienne.

Cette campagne de mesure prévoyait 7 prélèvements ponctuels quotidiens en 5 points distincts positionnés suivant le transect du pont Cessart (rive droite, $\frac{1}{4}$, milieu, $\frac{3}{4}$, rive gauche) afin d'étudier plus précisément les hétérogénéités latérales de concentration à Saumur (mises en exergue par les mesures de l'ACRO) et les phénomènes susceptibles de les expliquer (rejets des CNPE, débit de la Loire et de la Vienne, confluence Loire-Vienne...)

Parallèlement aux mesures acquises sur le terrain dans le cadre de cette étude, des modélisations des concentrations en tritium de la Loire ont été réalisées, à partir des données de rejets déclarés par EDF et des données hydrauliques des fleuves sur la période considérée.

Ces modélisations monodimensionnelles (hypothèse de mélange transversal homogène) puis bidimensionnelles (modélisation de la distribution transversale des concentrations) ont permis d'estimer les concentrations attendues en tritium dans la Loire et de les comparer aux mesures des prélèvements réalisés pendant la campagne au niveau du pont Cessart à Saumur ainsi qu'aux mesures de surveillance de l'environnement situées à la SMP aval.

Cette comparaison modèle-mesure a pour objectif d'améliorer la compréhension de l'influence des différents paramètres (rejets de Chinon, rejets des CNPE amont de Chinon sur la Loire, rejets de Civaux, débit Loire, débit Vienne, confluence Vienne-Loire) sur la dispersion des rejets de Chinon au niveau de Saumur (environ 20 km en aval) mais également au niveau de la SMP aval où sont effectuées les mesures de surveillance (environ 6 km en aval des rejets de Chinon).

La suite de ce rapport présente l'étude préliminaire de septembre 2020, la campagne de prélèvements et de mesures effectuées au pont Cessart pendant 5 mois, la mise en œuvre des outils de modélisation par l'IRSN pour interpréter les mesures à savoir SYMBIOSE (monodimensionnel) et CASTEAUR 2D (bidimensionnel) ainsi que les conditions environnementales (température, rejets...) rencontrées durant la campagne de mesures mises en regard de celles de janvier 2019.

2.2 ETUDE PRELIMINAIRE EN SEPTEMBRE 2020

Afin d'évaluer la faisabilité technique de l'étude planifiée pour débuter en fin d'année 2020, une étude préliminaire a été réalisée du 14 au 18 septembre 2020 sur la Loire entre le CNPE de Chinon et Saumur. La période de prélèvement a été choisie en concertation avec EDF qui a exceptionnellement accepté de prévenir l'IRSN, avec un préavis de quelques jours, des dates de rejets de la centrale de Chinon. Cette étude préliminaire a permis d'avoir une première idée des conditions hydrologiques de la Loire et des variations spatiales des concentrations en tritium mais également d'éprouver la méthodologie retenue pour la modélisation des transferts du tritium dans la Vienne et la Loire grâce aux données obtenues.

Présentation

Points de prélèvement

15 points de prélèvements ont été sélectionnés de l'amont du CNPE à l'aval du pont Cessart, comme représenté sur la figure ci-dessous.

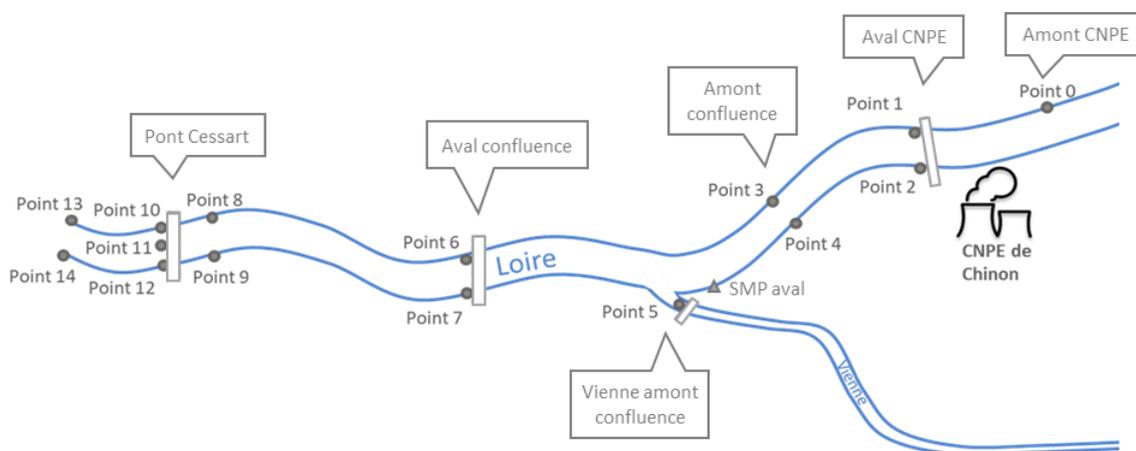


Figure 12 : Localisation des points de prélèvements de l'étude préliminaire

Tableau 7 : Libellé et localisation des points de prélèvement de l'étude préliminaire

Libellé du point	Situation géographique
Point 0	Loire, amont CNPE
Point 1	Loire, aval immédiat CNPE, rive droite
Point 2	Loire, aval immédiat CNPE, rive gauche
Point 3	Loire, amont confluence, rive droite
Point 4	Loire, amont confluence, rive gauche
Point 5	Vienne, amont confluence
Point 6	Loire, aval confluence, rive droite
Point 7	Loire, aval confluence, rive gauche
Point 8	Loire, amont pont Cessart, rive droite
Point 9	Loire, amont pont Cessart, rive gauche
Point 10 (ou A)	Loire, pont Cessart, rive droite
Point 11 (ou F)	Loire, pont Cessart, centre du pont
Point 12 (ou K)	Loire, pont Cessart, rive gauche
Point 13	Loire, aval pont Cessart, rive droite
Point 14	Loire, aval pont Cessart, rive gauche

Le positionnement des points a été choisi afin de disposer de premiers éléments sur la concentration en tritium sur la portion étudiée (amont vers aval), d'observer l'influence des rejets des CNPE amont de Chinon ainsi que la répartition de la concentration en tritium sur la largeur du fleuve, d'appréhender l'influence du mélange de la Vienne avec la Loire ainsi que les variations de concentrations en tritium au niveau du pont Cessart dans la perspective de l'étude.

Des prélèvements à haute fréquence (toutes les heures) ont été réalisés dans la Loire durant les 5 jours depuis le pont Cessart : rive droite (point 10 ou A), centre du pont (point 11 ou F) et rive gauche (point 12 ou K)⁹.

Plusieurs sessions de prélèvements ont également été réalisées, de l'amont du CNPE de Chinon à l'aval du pont Cessart, en tenant compte de la vitesse d'écoulement de la Loire afin de synchroniser l'ensemble des prélèvements avec la progression du fleuve.

Ces prélèvements ont été conservés en glacières réfrigérées et rapatriés aux laboratoires IRSN du Vésinet pour analyse.

Rejets du CNPE de Chinon pendant la campagne préliminaire

La mission de prélèvements a été fixée en fonction des périodes de rejets prévus par le CNPE de Chinon qui ont débuté le dimanche 13 septembre 2020 à 10 h 14 pour se terminer le jeudi 16 septembre 2020 à 20 h 40, la date de fin de rejet ayant été communiquée à l'IRSN par EDF au cours de la semaine.

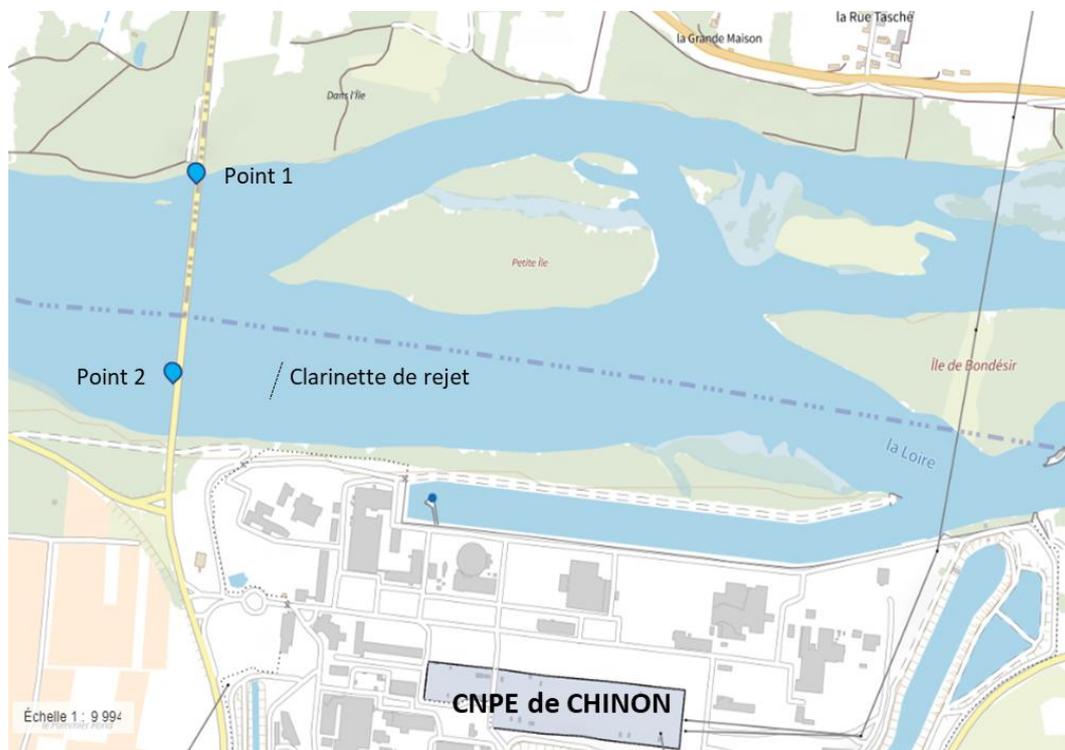


Figure 13 : Localisation de la clarinette de rejet et des points de prélèvement 1 et 2

Débit des cours d'eau

Le régime hydraulique de la Loire à Saurmur au cours de la semaine correspondant à l'étude préliminaire est un régime de faible débit, de l'ordre de 100 m³/s, proche de l'étiage.

⁹ Dans un premier temps, des valeurs numériques ont été attribuées aux points de prélèvement sur le pont Cessart (10,11 et 12) puis remplacées par des lettres lors de l'étude (de A à L) afin de pouvoir caractériser la totalité de la largeur du pont, entre chaque pile de celui-ci.

Résultats

Mesure sur le trajet du rejet entre l'amont du CNPE de Chinon et l'aval du pont Cessart

Sur cette semaine de prélèvements (14 au 18 septembre 2020), les concentrations significatives en tritium dans la Loire ont varié entre 2,75 Bq/L et 84,5 Bq/L.

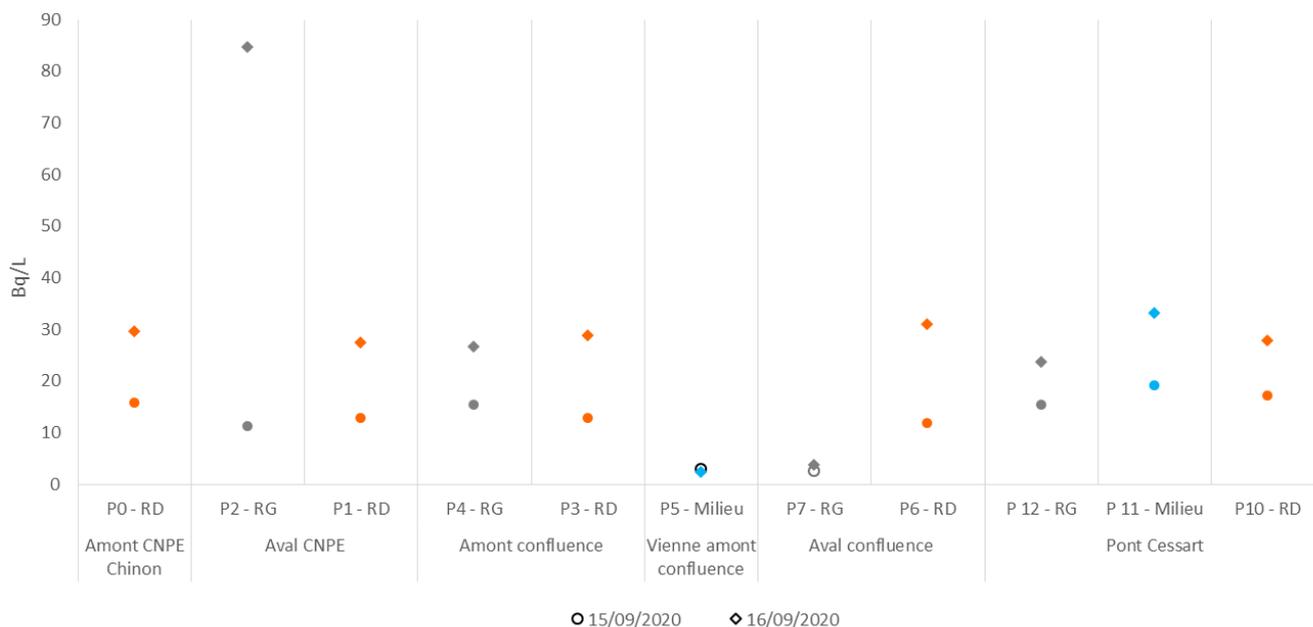


Figure 14 : Concentrations en tritium dans la Loire de l'amont du CNPE de Chinon au pont Cessart

Pour les deux séquences (15/09/2020 et 16/09/2020), les prélèvements réalisés en amont du CNPE de Chinon permettent de mesurer la concentration liée aux rejets des CNPE en amont.

En fonction de la rive sur laquelle est prélevée l'eau, les concentrations en aval immédiat du site (point 1 et 2) ne témoignent pas systématiquement du passage du rejet de Chinon. Le 16 septembre, la concentration en rive gauche, très supérieure à celle de l'amont, rend compte de l'ajout de concentrations par le rejet de Chinon, alors qu'en rive droite la différence amont/aval n'est pas notable.

Il est toutefois à noter que la valeur de 80 Bq/L observée au point 2 est la plus élevée mesurée au cours de l'étude préliminaire et laisse à supposer que ce point de prélèvement se trouvait dans le panache de rejet au moment du prélèvement. La détection du rejet en rive gauche n'est cependant pas systématique, le point de prélèvement étant en bordure du panache.

A 4 km en aval de la zone de rejet, avant la confluence Loire/Vienne, les résultats aux points 3 et 4 sont proches de ceux de l'amont de Chinon et témoignent de l'absence de mélange homogène du rejet avec les eaux de la Loire au niveau des rives.

Les niveaux au point 6 en rive droite après la confluence Loire-Vienne, sont du même ordre que les niveaux observés aux points 3 et 4 sur la Loire en amont de la confluence.

La concentration au point 7, en aval de la confluence en rive gauche, est proche du seuil de décision et de la mesure au point 5, réalisée dans la Vienne en amont de la confluence. La Vienne semble ainsi rester en rive gauche sans se mélanger à la Loire.

Au cours de cette semaine, c'est au milieu du pont Cessart que l'on observe les concentrations les plus élevées, laissant supposer un passage préférentiel du rejet de Chinon au centre du fleuve. Les résultats obtenus confirment l'hétérogénéité de la concentration en tritium sur la largeur de la Loire ; ceux-ci sont compris entre 13 et 35 Bq/L et évoluent en fonction des rejets mais également latéralement au cours du temps.

Mesure au pont Cessart

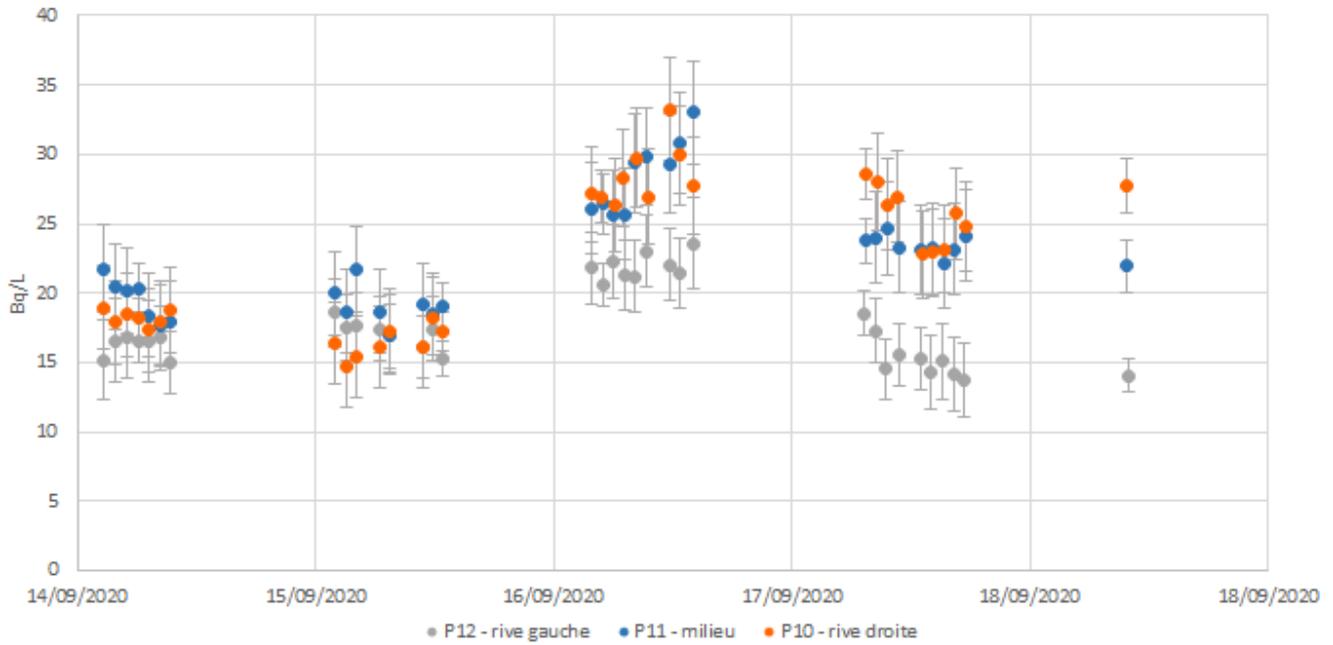


Figure 15 : Concentrations en tritium en trois points du pont Cessart entre le 14 et le 18 septembre 2020

On observe une faible variabilité des mesures les 14 et 15 septembre. Celle-ci tend à augmenter entre la rive gauche et le reste du cours d'eau le 16. En fin de semaine, la dispersion latérale est plus importante, atteignant un facteur 2 au cours de la journée du 17, entre la rive droite et la rive gauche.

La Figure 16 ci-dessous montre les variations de concentration entre les rives et le milieu du pont. En début de semaine les valeurs, autour de 20 Bq/L, sont légèrement supérieures au centre de la Loire, puis à partir du 16, les concentrations augmentent sensiblement, notamment au centre et en rive droite, induisant un gradient de concentration d'une rive à l'autre. On note que les valeurs les plus basses sont quasiment toujours mesurées sur les échantillons de la rive gauche.

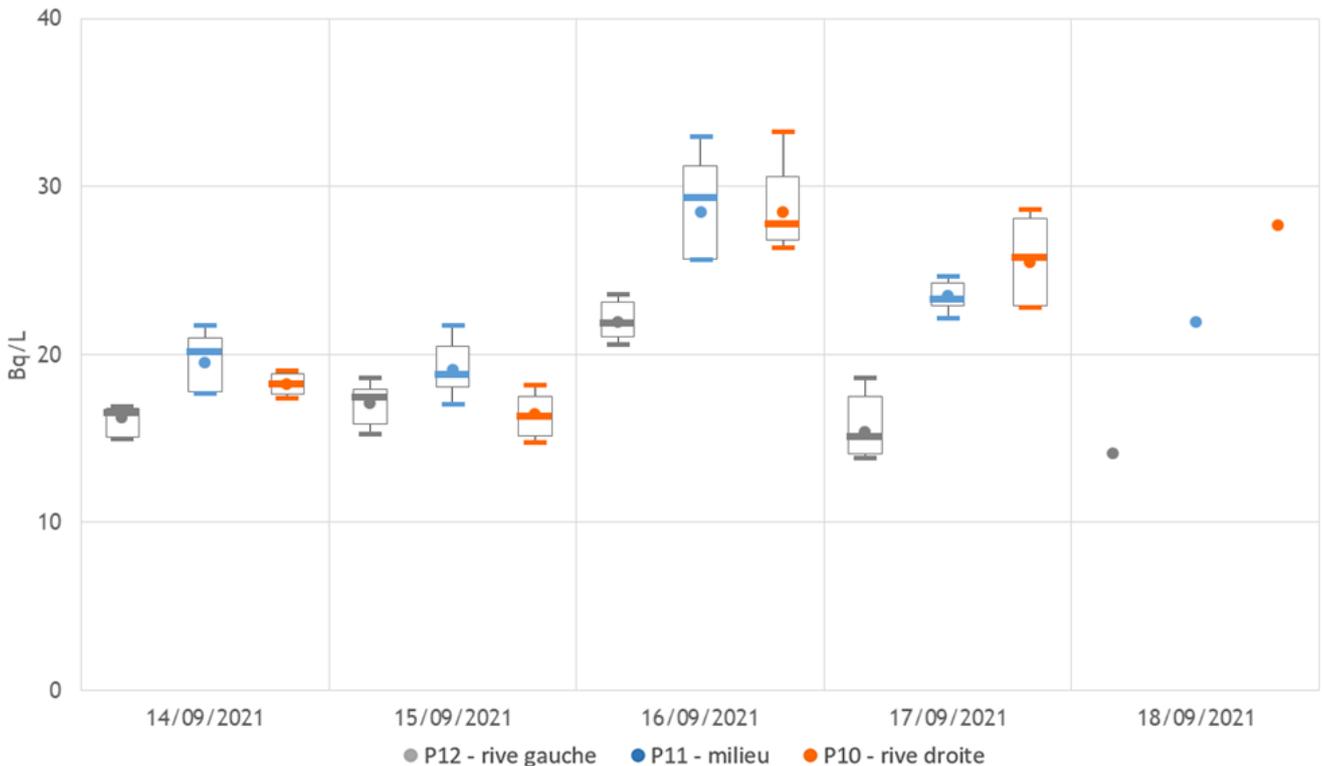


Figure 16 : Gamme de concentrations en tritium au pont Cessart entre le 14 et le 18 septembre 2020

2.3 LA CAMPAGNE DE PRELEVEMENT

La campagne de prélèvement s'est déroulée du 9 novembre 2020 au 8 avril 2021 au niveau du pont Cessart, sur le bras de la Loire s'écoulant à la gauche de l'île d'Offard.

Deux types de prélèvements ont été réalisés quotidiennement :

- manuels avec un seau en trois points depuis le pont Cessart ;
- automatiques via deux hydrocollecteurs positionnés en rive gauche et droite en amont du pont.



Figure 17 : Localisation des points de prélèvement dans la Loire au niveau du pont Cessart

Déploiement et installation du matériel à Saumur

Les hydrocollecteurs ont été installés par l'IRSN après obtention de l'accord des autorités responsables concernées :

- autorisation par arrêté municipal d'occupation temporaire du domaine public quai de la Marine en rive droite ;
- autorisation temporaire d'occupation du domaine fluvial pour le positionnement des systèmes de pompage dans le cours de la Loire par la direction départementale des territoires du Maine et Loire.

En rive droite sur le quai de la Marine, l'appareil a été installé en bordure du chemin piétonnier. Celui-ci a fonctionné dans un premier temps sur batterie puis a été raccordé le 4 décembre 2020 à une alimentation électrique temporaire mise en place spécifiquement pour l'étude. Le système de pompage lesté a été positionné dans le cours de la Loire à environ 4 m du bord du quai avec le concours du SDIS 49¹⁰.

En rive gauche, le préleveur a été placé en bordure du quai Lucien Gauthier, au plus proche de l'eau. Une alimentation électrique a été mise à disposition par la mairie lors de l'installation. Le système de pompage a été placé dans le courant à quatre mètres de la berge et maintenu à l'aide d'un cordage.

¹⁰ SDIS49, Service Départemental d'Incendie et de Secours de Maine-et-Loire



Figure 18 : Hydrocollecteur en rive gauche, quai Lucien Gauthier



Figure 19 : Hydrocollecteur en rive droite, quai de la Marine (Ile d'Offard)

Les prélèvements automatiques se sont déroulés sans difficulté jusqu'au 17 décembre 2020. A partir de cette date, la montée du niveau de la Loire et le charriage de nombreux débris ont provoqué un encombrement fréquent des systèmes de pompage et un rabattement de ceux-ci contre la berge, nécessitant de faire intervenir les plongeurs du SDIS 49 à plusieurs reprises. Afin de pallier ces problèmes récurrents, le matériel en rive gauche a été déplacé le 13 janvier 2021 de quelques mètres pour permettre de fixer le système de pompage à l'arrière du bateau à fond plat amarré au quai.

Cette solution a permis de poursuivre l'étude jusqu'à ce que la Loire soit en crue. Les appareils ont alors été retirés en urgence, avant que l'eau ne recouvre le quai en rive gauche le 1^{er} février 2021 et celui de la rive droite le 3 février 2021. Les deux hydrocollecteurs ont pu être repositionnés le 3 mars 2021.

Durant cette période, des prélèvements de substitution ont été réalisés aux points A et L tous les matins à 9 h 30.



Figure 20 : Localisation des points de prélèvement de substitution A et L pendant la période de crue

Les derniers prélèvements de l'étude ont été réalisés le 8 avril 2021 et les appareils ont été retirés définitivement le 13 avril 2021.

Réalisation de la campagne de prélèvement

Pour des raisons de disponibilité et de charge de travail, la campagne de prélèvements sur le terrain à Saumur a été sous-traitée par l'IRSN à un laboratoire privé appliquant les protocoles élaborés par l'Institut et contrôlés par ce dernier.

L'agence d'Angers de la société Inovalys a été la seule à répondre à la sollicitation de l'IRSN à la suite de l'appel d'offres émis dans le cadre de l'étude. La fréquence de prélèvement imposant une présence quotidienne (y compris le week-end et les jours fériés), et l'IRSN souhaitant contracter avec un organisme disposant des agréments relatifs aux prélèvements d'eau et satisfaisant aux exigences de la norme NF EN ISO/IEC 17025 : 2017, ainsi qu'aux prescriptions du Cofrac pour les activités environnement, Inovalys répondait aux critères requis pour cette étude.

Le contrat a été signé après une visite des locaux de l'agence Inovalys d'Angers par l'IRSN.

À la suite de l'information par EDF de l'existence d'une contractualisation d'activités de prélèvements sur certains CNPE avec l'agence Inovalys de Tours, les garanties de confidentialité et d'impartialité de la société, encadrées notamment par leur accréditation Cofrac, renforcées par le fait que les agences d'Angers et de Tours sont distinctes, ont été présentées par Inovalys au Comité de suivi le 2 décembre 2020. A l'issue de cette présentation, aucune remarque n'a été faite par le Comité de suivi et le choix d'Inovalys Angers pour la réalisation des prélèvements de l'étude a été entériné.

Après une présentation des pratiques et modes opératoires à suivre réalisée par l'IRSN sur le terrain le 6 novembre 2020, les 4 intervenants d'Inovalys ont assuré quotidiennement, chaque matin à 9 h 30, le prélèvement et l'échantillonnage de l'eau de la Loire en 5 points, pendant la durée de l'étude. Parallèlement aux prélèvements manuels réalisés depuis le pont Cessart, les prélèvements biquotidiens (9 h 30 et 21 h 30) des deux hydrocollecteurs étaient récupérés tous les matins.

Chaque prélèvement a été fractionné directement sur le terrain, après homogénéisation, afin de constituer 3 aliquotes identiques : un flacon de 100 mL pour l'IRSN, un flacon de 100 mL pour EDF¹¹ et un flacon témoin de 300 mL conservé dans les chambres froides d'Inovalys (pour d'éventuelles analyses contradictoires ou complémentaires). L'ACRO n'a pas souhaité pour sa part qu'une aliquote lui soit transmise.



Figure 21 : Prélèvement et mesures physicochimiques au point J sur le pont Cessart

Chaque prélèvement manuel a également fait l'objet de mesures physicochimiques (température, pH et conductivité), et d'une prise de photo géoréférencée et horodatée, à des fins de traçabilité.

Tous les prélèvements ont été conditionnés en flacons de verre brun munis de bouchons inviolables, transportés et conservés à 4°C depuis le lieu de prélèvement vers le lieu d'entreposage Inovalys, puis jusqu'aux laboratoires de l'IRSN au Vésinet (78) et d'EDF à Chinon.

Chaque lundi, les prélèvements de la semaine précédente ont été expédiés aux destinataires en transport express réfrigéré, et l'ensemble des données relatives aux échantillons déversées sur un répertoire partagé entre Inovalys et l'IRSN.

¹¹ Lors de la réunion de lancement de la campagne avec les parties prenantes, seul EDF a fait part de son souhait de recevoir une aliquote des échantillons pour analyse.

Afin de pouvoir s'assurer du respect des procédures de prélèvements, élaborées par l'IRSN, par les intervenants d'Inovalys, des contrôles inopinés ont été menés par l'IRSN au cours de l'étude. Ceux-ci ont permis de constater une parfaite application des instructions. Les résultats des prélèvements réalisés en parallèle de ceux d'Inovalys par l'IRSN lors de ces contrôles sont donnés en annexe 10.5. Tous se sont avérés cohérents.

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des informations caractérisant le prélèvement pour chaque point de l'étude.

Tableau 8 : Récapitulatif des points de prélèvements et mesures associées

Lieu de prélèvement	Type de prélèvement	Fréquence	Volume prélevé	Aliquotage	Données associées
Point C : pont Cessart ¼ rive droite	Manuel	1 / jour à 9h30	4 L	2 x 100 mL 1x 300 mL	Photographie géoréférencée, horodatée + mesures physicochimiques
Point F : pont Cessart milieu	Manuel	1 / jour à 9h30	4 L	2 x 100 mL 1x 300 mL	Photographie géoréférencée, horodatée + mesures physicochimiques
Point J : pont Cessart ¼ rive gauche	Manuel	1 / jour à 9h30	4 L	2 x 100 mL 1x 300 mL	Photographie géoréférencée, horodatée + mesures physicochimiques
Hydro RD : Rive droite amont du pont Cessart	Automatique	2 / jour à 9h30 et 21h30	1 L	2 x 100 mL 1x 300 mL	Photographie géoréférencée
Hydro RG : Rive gauche amont du pont Cessart	Automatique	2 / jour à 9h30 et 21h30	1 L	2 x 100 mL 1x 300 mL	Photographie géoréférencée
<i>En substitution des prélèvements par les hydrocollecteurs arrêtés durant l'épisode de crue du 1er / 3 février au 3 mars 2021 :</i>					
Point A : pont Cessart rive droite	Manuel	1 / jour à 9h30	4 L	2 x 100 mL 1x 300 mL	Photographie géoréférencée + mesures physicochimiques
Point L : pont Cessart rive gauche	Manuel	1 / jour à 9h30	4 L	2 x 100 mL 1x 300 mL	Photographie géoréférencée + mesures physicochimiques

EN RESUME



Points C, F et J, sur le pont Cessart, aliquotage de 500 mL tous les jours à 9h30

Hydrocollecteurs rive droite et rive gauche, aliquotage de 500 mL tous les jours à 9h30 et 21h30

Traitement et mesure

Les caractéristiques de chaque échantillon ont été enregistrées dans le système d'information de l'IRSN. Chacun a ensuite fait l'objet d'une homogénéisation et d'une filtration à 0.45 µm. Une solution comprenant une prise d'essai de 10 mL à laquelle a été ajouté 10 mL de liquide scintillant a ensuite été préparée pour mesure.

Les mesures ont été réalisées sur des compteurs Perkin Elmer TRICARB, après réalisation d'un mouvement propre du compteur à l'aide d'eau des Abatilles, avec un temps de comptage de 50 minutes sur 4 cycles, permettant d'obtenir un seuil de décision (SD) de 2,3 Bq/L environ avec une incertitude à $k = 2$.

2.4 OUTILS DE MODELISATION DE L'IRSN ET DEMARCHE

En raison du domaine à modéliser (5 CNPE répartis sur plusieurs centaines de km de la Loire et la Vienne avec des temps de transit de plusieurs jours) et du délai de réponse attendu, la modélisation 1D sous hypothèse de mélange transversal homogène s'est imposée pour les investigations préliminaires de 2019. Pour cela, l'IRSN dispose du code CASTEAUR qui se présente sous une version autonome et une version encapsulée dans la plateforme SYMBIOSE, plateforme de simulation du transfert de radionucléides dans les écosystèmes et de calcul de leur impact dosimétrique sur l'homme et le biota non humain.

Ces deux versions appliquent les mêmes modèles et se distinguent par leurs sources de données. Pour décrire l'hydrographie des cours d'eau, la version autonome CASTEAUR dispose d'une base de données simplifiée construite au début des années 2000 par compilation d'informations recueillies auprès d'organismes et d'acteurs de terrain. La version SYMBIOSE s'appuie quant à elle sur des informations plus précises, spatialisées, actualisées et traitées à partir de systèmes d'informations géographiques (SIG).

En pratique, il faut considérer que dans sa version autonome le code CASTEAUR apporte une mise en œuvre rapide et qu'il est plus approprié aux besoins de l'expertise sous sa version SYMBIOSE. Dans ce contexte, les premières investigations ont donc été réalisées dans un délai court à partir de la version autonome alors que l'analyse et l'interprétation des données de la campagne IRSN se sont appuyées sur la version SYMBIOSE.

Les premières modélisations réalisées à partir de la version autonome de CASTEAUR ont montré que la Loire au pont Cessart, au moment du prélèvement de l'ACRO le 21 janvier 2019, était marquée par des rejets des CNPE de Chinon, Belleville et Civaux et que, sous l'hypothèse de mélange transversal homogène, leur cumul (de l'ordre de 60 Bq/L) était loin d'atteindre le niveau de la mesure atypique. Sur la période de décembre 2018 à janvier 2019, ces modélisations (rapport IRSN/PSE-ENV/2020-00105) ont également mis en exergue que la SMP aval du CNPE de Chinon ne détecte pas systématiquement les rejets de ce dernier.

De facto, l'évaluation de l'hypothèse que les conditions de mélange à l'aval du CNPE de Chinon puissent être à l'origine de la mesure atypique a motivé la campagne de mesure de l'IRSN et la mise en œuvre de modélisations 1D à partir de la plateforme SYMBIOSE selon deux scénarii :

1. absence de mélange Loire / Vienne ;
2. mélange homogène de la Loire et la Vienne à l'aval de leur confluence.

Pour compléter l'interprétation de ces données, la démarche a été renforcée par une modélisation 2D susceptible de détailler, en fonction des conditions hydrauliques de la Loire et de la Vienne, les distributions latérales des concentrations à l'aval du CNPE de Chinon en différentes sections sur le parcours des rejets (SMP et pont Cessart).

La mise en œuvre des modèles 1D et 2D utilisés au fil de cette démarche est décrite ci-après. Les aspects théoriques sont détaillés en annexes 10.2 et 10.3.

Préparation des modèles pour l'étude

Modélisation 1D

Calculs envisagés

Dans le cadre de cette étude, le transfert du tritium émis par les cinq CNPE du bassin versant de la Loire est simulé par modélisation 1D afin d'estimer les concentrations en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur, environ 20 km en aval du CNPE de Chinon, et au niveau de la SMP aval de Chinon, environ 6 km en aval du CNPE. L'objectif est double : effectuer en

ces points une comparaison des niveaux prédits et des niveaux mesurés, et aider à l'interprétation des niveaux mesurés par l'analyse des contributions apportées par chacun des CNPE.

Pour ce faire, le jeu de données nécessaire à la modélisation est préparé en trois étapes :

- la constitution d'un modèle du réseau fluvial d'intérêt, constitué de la Vienne et de la Loire depuis l'amont de Civaux et de Belleville jusqu'à l'aval de Saumur ;
- la collecte et le prétraitement de données de débit en Vienne et en Loire et réalisation d'un calcul hydraulique permettant de retrouver les débits mesurés en diverses stations le long de ces cours d'eau ;
- la compilation et le prétraitement des données de rejet de tritium des 5 CNPE du bassin versant de la Loire.

Il a été envisagé que la Loire et la Vienne pouvaient ne pas être complètement mélangées au niveau de Saumur, 13 km en aval de leur confluence, lors de la mesure atypique du 21 janvier 2019. L'étude d'une image satellitaire issue du réseau de satellites Sentinel disponible pour le 15/01/2019 (Figure 22) suggère effectivement que la Vienne, masse d'eau de couleur plus sombre que la Loire sur cette image, resterait bien plaquée en rive gauche depuis la confluence jusqu'en aval de Saumur.

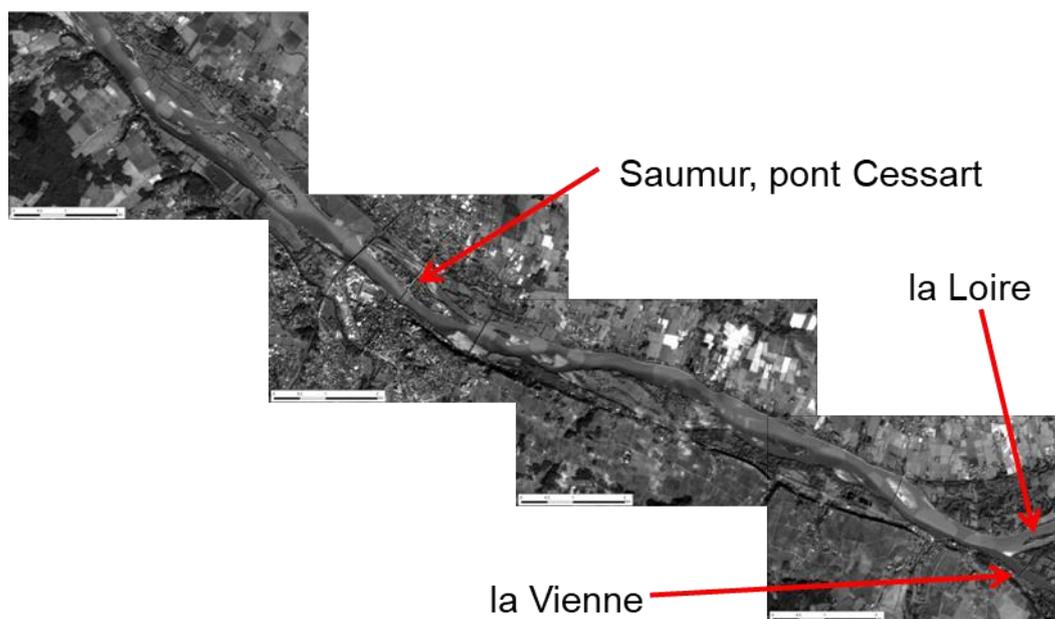


Figure 22 : Extraits d'une image satellitaire Sentinel 2X en date du 15/01/2019 montrant la Loire depuis sa confluence avec la Vienne jusqu'en aval de Saumur

Deux situations simplifiées sont investiguées par le calcul afin d'affiner les interprétations de la comparaison modèle-mesure :

- **Première situation : la Vienne et la Loire sont deux cours d'eau parfaitement mélangés au niveau de Saumur**

Dans ce cas, la concentration en tritium modélisée au niveau du pont Cessart est la somme des contributions :

- du CNPE de Civaux, en tenant compte de leur dilution par les eaux de la Loire en aval de la confluence ;
- des CNPE de la Loire, en tenant compte de leur dilution par les eaux de la Vienne en aval de la confluence.

A des fins d'interprétation des mesures, on s'intéressera aux contributions à cette concentration totale de :

- la concentration due aux rejets de Civaux ;
- la concentration due aux rejets de Chinon ;
- la concentration due aux rejets des 3 CNPE à l'amont de Chinon.

- **Seconde situation : la Vienne et la Loire sont deux cours d'eau qui ne sont pas mélangés au niveau de Saumur**

Cette situation traduit un état où les deux cours d'eau se partagent le lit de la Loire, sans que les masses d'eau ne se mélangent. Dans ce cas, on ne modélise plus une concentration "totale" à Saumur, due aux 5 CNPE du bassin versant mais :

- une concentration due aux rejets de Civaux, portée par la Vienne, sans dilution par les eaux de la Loire en aval de la confluence ;
- une concentration due aux rejets des CNPE de la Loire, portée par la Loire, sans dilution par les eaux de la Vienne en aval de la confluence. A des fins d'interprétation, on s'intéressera ici encore aux contributions à cette concentration de :
 - la concentration due aux rejets de Chinon ;
 - la concentration due aux rejets des 3 CNPE à l'amont de Chinon.

Modèle du réseau fluvial

Un cours d'eau est modélisé dans SYMBIOSE par un linéaire et peut être généré automatiquement par un préprocesseur spatial qui exploite des bases de données géographiques. Le cours d'eau est discrétisé en biefs dont les caractéristiques sont supposées homogènes - notamment la largeur, la pente, l'angle des berges, un coefficient dit de Strickler (qui est fonction de la rugosité du fond et des berges). Le préprocesseur évalue de manière automatisée les caractéristiques géographiques et géométriques du cours d'eau qui sont requises par le calcul, de sa source à son exutoire (e.g. distance curviligne, largeur, pente, points de confluence et défluent, etc.). L'IRSN a ainsi constitué une bibliothèque de paysages géoréférencés spécifiques à chaque CNPE d'EDF, comportant en particulier les linéaires modélisés de la Loire et de la Vienne.

Les paysages de cette bibliothèque ont été utilisés pour cette étude, avec un réseau constitué de la Loire et de la Vienne. La Loire est modélisée sur environ 300 km depuis l'amont de Belleville, au niveau de la commune de Saint Satur, jusqu'en aval de Saumur ; la Vienne est modélisée sur environ 100 km depuis l'amont de Civaux, au niveau de la commune de Lussac-les-Châteaux, jusqu'à sa confluence avec la Loire, 13 km en amont du pont Cessart. Les entrées du réseau ont été choisies car des stations HYDRO¹² y sont installées, qui permettent de connaître les flux d'eau (débits) quotidiens y entrant.

Le linéaire de la Loire a néanmoins été adapté pour cette étude, suite à l'étude préliminaire qui a eu lieu entre Chinon et Saumur du 14 au 18 septembre 2020 et s'est déroulée en période d'étiage. Avec des débits particulièrement faibles (de l'ordre de 70 m³/s au niveau de Chinon), le lit s'est révélé bien plus étroit par endroit que celui renseigné par défaut dans les paysages de SYMBIOSE, qui reposent sur des bases de données où la Loire occupe tout son lit. L'utilisation d'une largeur erronée dans le modèle de transfert en rivière de SYMBIOSE entraînerait notamment une erreur sur les vitesses d'écoulement calculées et donc sur les temps d'arrivée des rejets des CNPE en un point d'intérêt. Il eût été possible de compenser cette erreur en ajustant par calage le coefficient de Strickler des biefs (traduisant la rugosité du fond) sans modifier les largeurs par défaut, mais il a été jugé opportun et plus réaliste de les mettre à jour par exploitation d'images satellitaires de la Loire prises lors de cette période d'étiage.

La recherche d'images satellitaires sur la période d'intérêt a permis d'identifier 17 images des satellites Sentinel 2A et 2B qui pouvaient être exploitées, avec une faible/absence de couverture nuageuse et permettant de couvrir la zone géographique d'intérêt (Figure 23). A partir de ces images, le modèle linéaire de la Loire a été constitué en suivant ces trois principales étapes :

- classification des pixels de chaque image, avec reconnaissance des surfaces en eau ;
- génération d'un surfacique pour représenter le cours d'eau dans un système d'information géographique ;
- génération d'un linéaire pour représenter le cours d'eau dans un système d'information géographique, en utilisant une méthode de triangulation. Cette opération est effectuée par le préprocesseur spatial de SYMBIOSE.

A l'issue de ce travail, le réseau modélisé pour l'étude est constitué de deux linéaires pour la Loire et la Vienne, d'une trentaine de biefs chacun. La largeur moyenne de la Loire entre Chinon et Saumur, adaptée à l'étude de cette période d'étiage, est inférieure d'environ 30% à celle du réseau disponible par défaut dans les bibliothèques de SYMBIOSE.

¹² La banque HYDRO, administrée et gérée par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, calcule les débits d'eau au niveau de stations sur les cours d'eau français, sur la base de mesures de hauteurs d'eau et de courbes de tarage. Ces données sont accessibles sur le site : www.hydro.eaufrance.fr

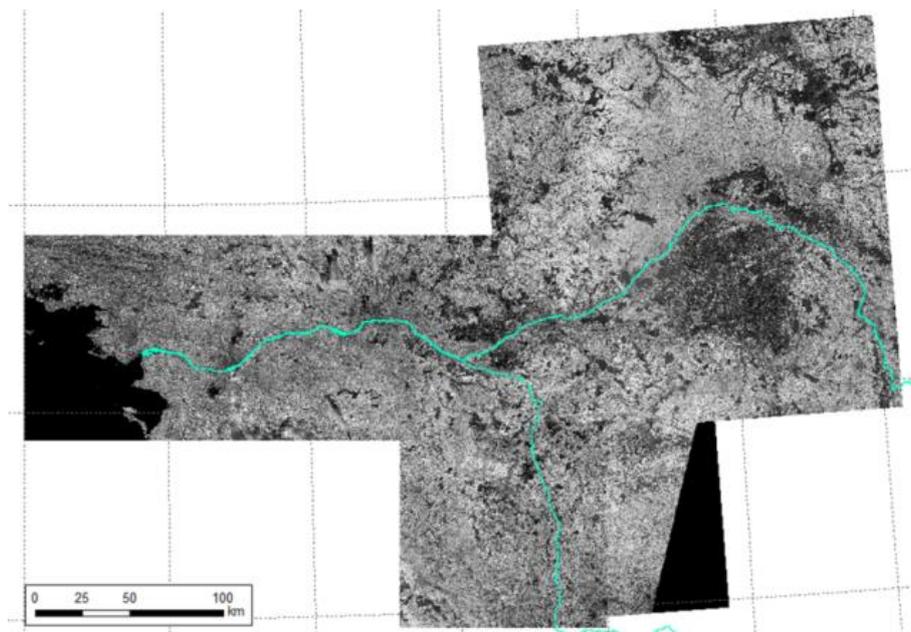


Figure 23 : Emprise couverte par les images des satellites Sentinel 2A et 2B pour générer un réseau hydrographique compatible avec les faibles largeurs de la période d'étiage observée lors de l'étude de faisabilité de la campagne de mesure, mi-septembre 2020

Calcul hydraulique

En amont du calcul du transfert de tritium rejeté dans un cours d'eau, il est nécessaire d'effectuer un calcul hydraulique dans ce dernier, l'eau étant le vecteur du transport du tritium.

Les apports d'eau entrant dans le modèle par les points amont des linaires représentant la Loire, à Saint-Satur, et la Vienne, à Lussac-les-Châteaux, sont les débits quotidiens renseignés dans la banque HYDRO aux stations correspondantes.

Pour tenir compte des apports et des pertes d'eau le long de ces cours d'eau, et en particulier des apports des principaux affluents sur le domaine d'étude (le Cher sur la Loire, le Clain et la Creuse sur la Vienne), les débits entrant dans les réseaux modélisés sont calés en différents points où l'on dispose de mesures de débits dans la banque HYDRO : à Gien, Blois, Onzain, Tours et Langeais pour la Loire et à Chauvigny, Ingrandes, Nouâtre et Chinon pour la Vienne (Figure 24). Ce calage consiste à injecter dans le modèle une chronique d'apport de ces stations, obtenue en soustrayant la chronique des débits mesurés à la chronique des débits simulés par la propagation des apports amont.

Il est à noter que la station HYDRO d'Orléans n'est pas exploitée, du fait d'un phénomène local sur une trentaine de kilomètres : avec un sous-sol calcaire dans cette région, un système karstique induit des écoulements souterrains de la Loire. Ainsi une partie du débit de la Loire est perdue au niveau de la commune de Jargeau, une vingtaine de km en amont d'Orléans, et donne naissance au Loiret via des résurgences au sud d'Orléans, qui se jette dans la Loire une dizaine de km en aval d'Orléans.

Il est à noter enfin qu'il est tenu compte d'une chronique d'apport au niveau de la confluence de l'Indre et de la Loire, calculée comme différence entre les débits mesurés à la station de Saumur, première station HYDRO en aval de l'Indre, et ceux simulés à Saumur en tenant compte des apports amont de la Loire et de la Vienne.

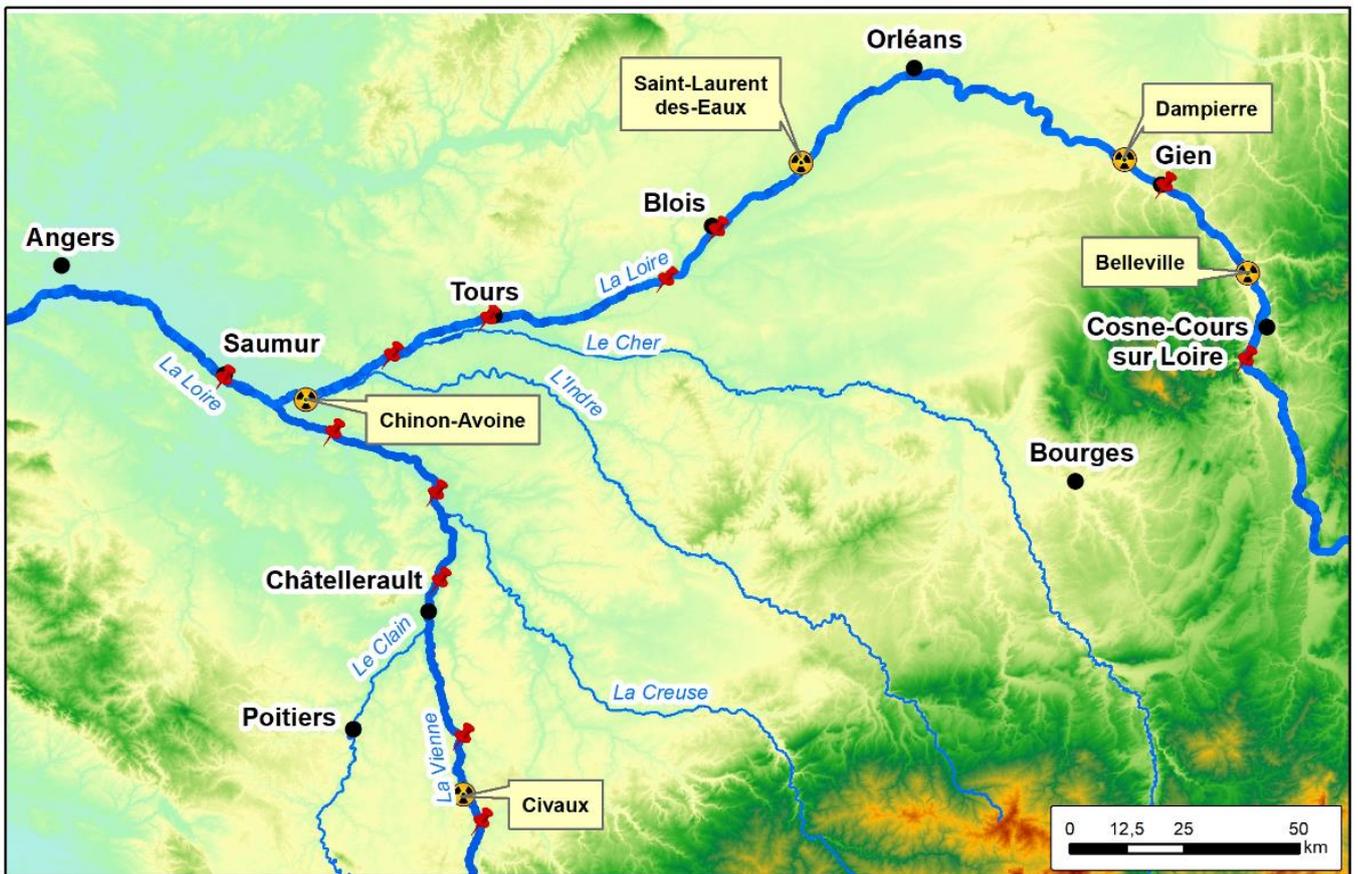
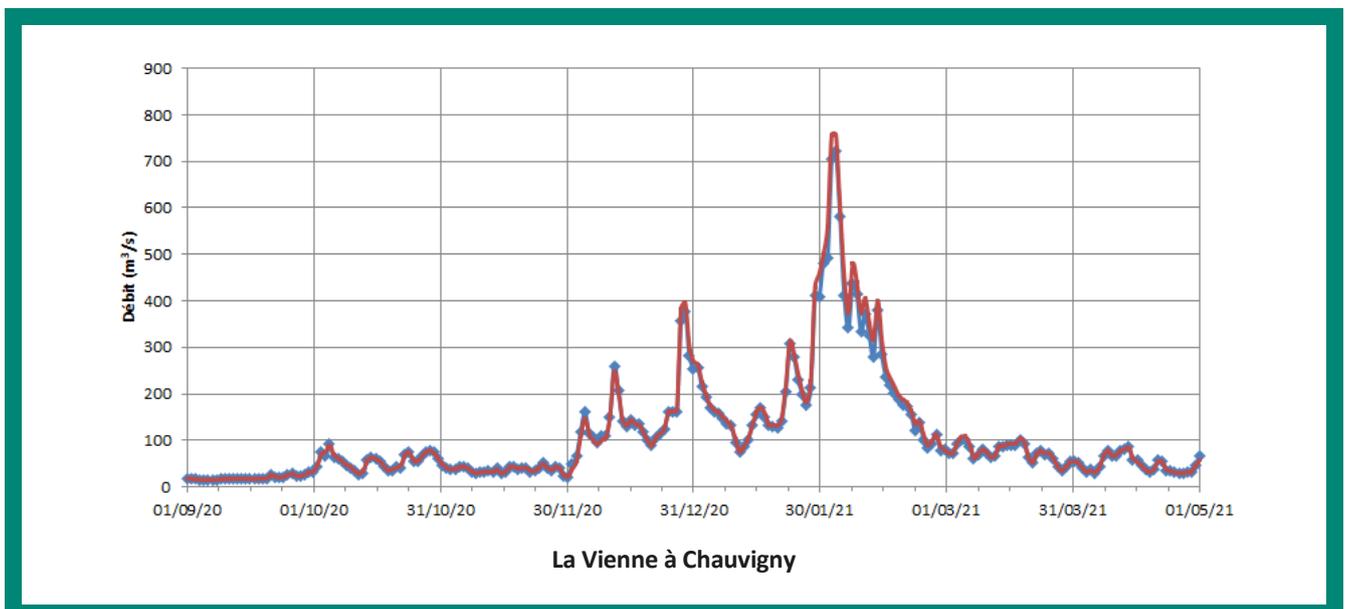
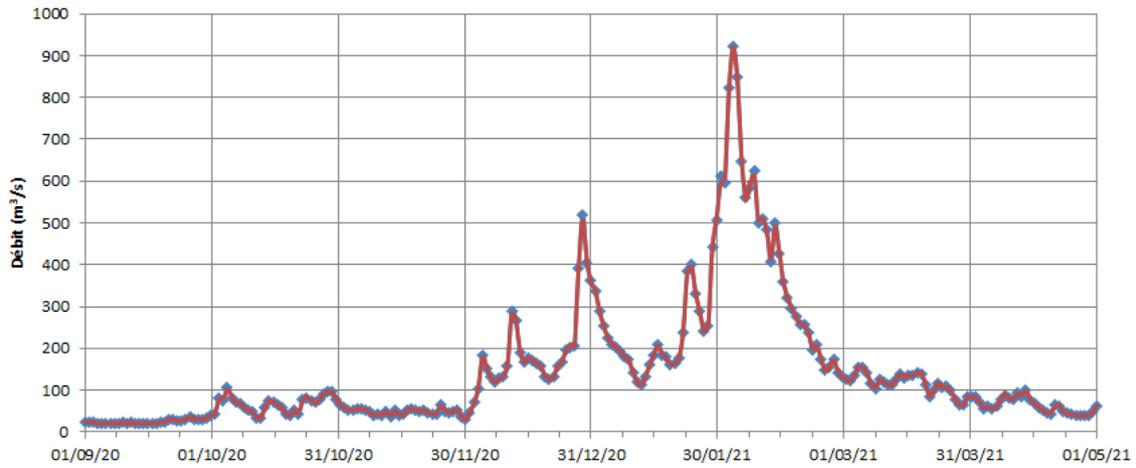


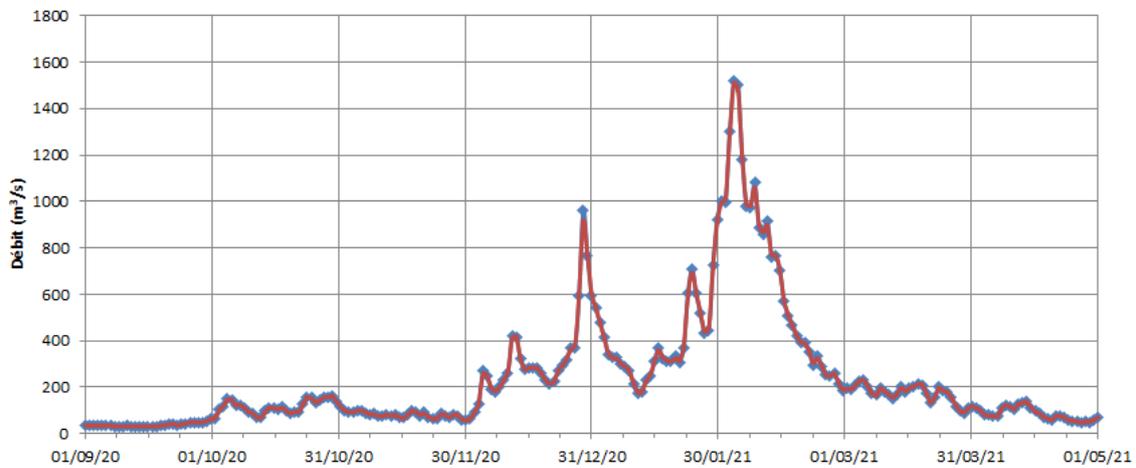
Figure 24 : Réseau fluvial modélisé (la Loire et la Vienne) pour l'étude, permettant le calcul simultané du transfert du tritium rejeté par Belleville, Dampierre, Saint Laurent, Chinon et Civaux, et stations HYDRO utilisées pour le calage hydraulique (points épinglés)

Les débits calculés par SYMBIOSE, à la suite de cette procédure de calage itératif d'amont en aval, sont comparés aux débits mesurés aux stations HYDRO retenues pour la Vienne (Figure 25) et pour la Loire (Figure 26). On observe une bonne cohérence modèle-mesure : la moyenne des écarts relatifs entre les débits quotidiens mesurés et ceux calculés, sur la période du 01/11/2020 au 08/04/2021, varie entre 0 et 3% selon les stations ; leur écart type varie entre 0 et 5% selon les stations.

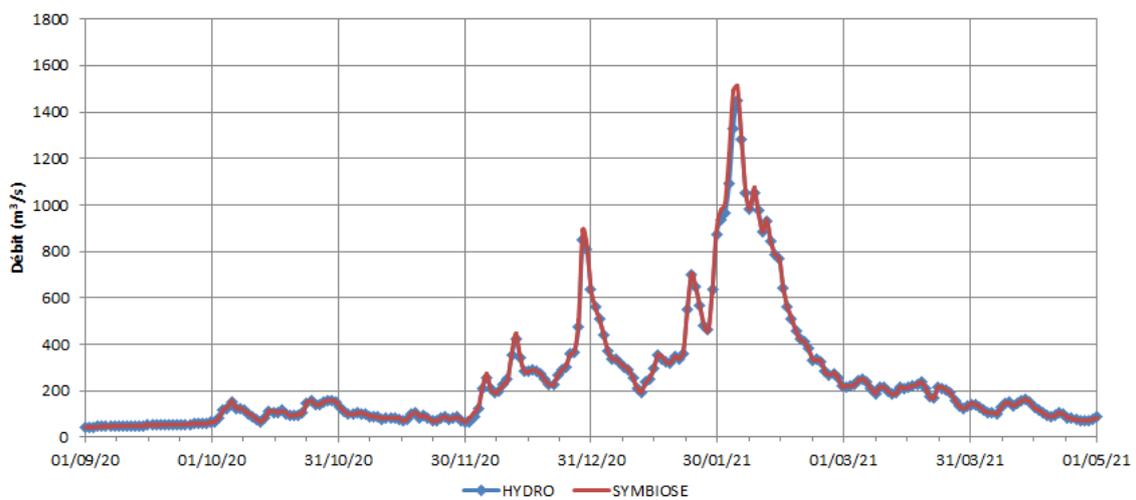




La Vienne à Ingrandes

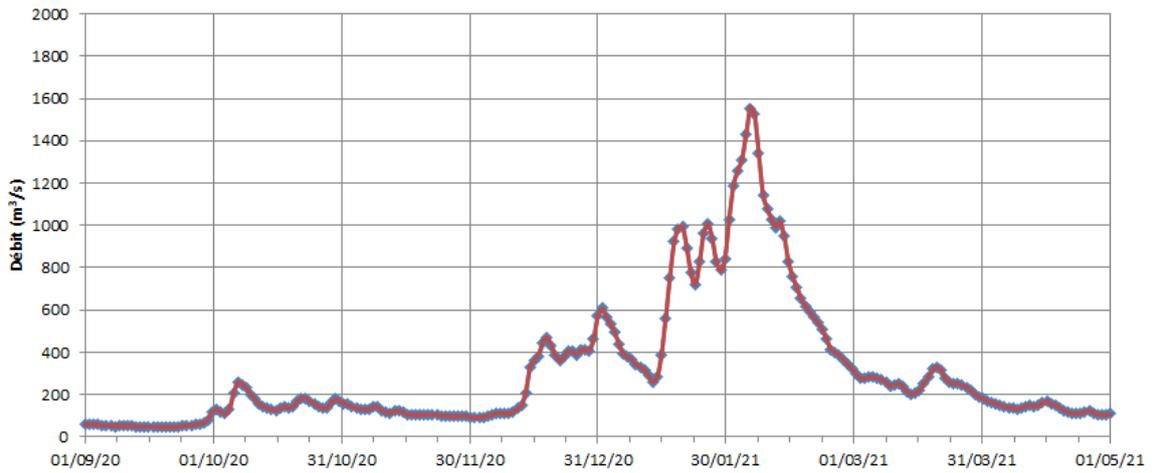


La Vienne à Nouâtre

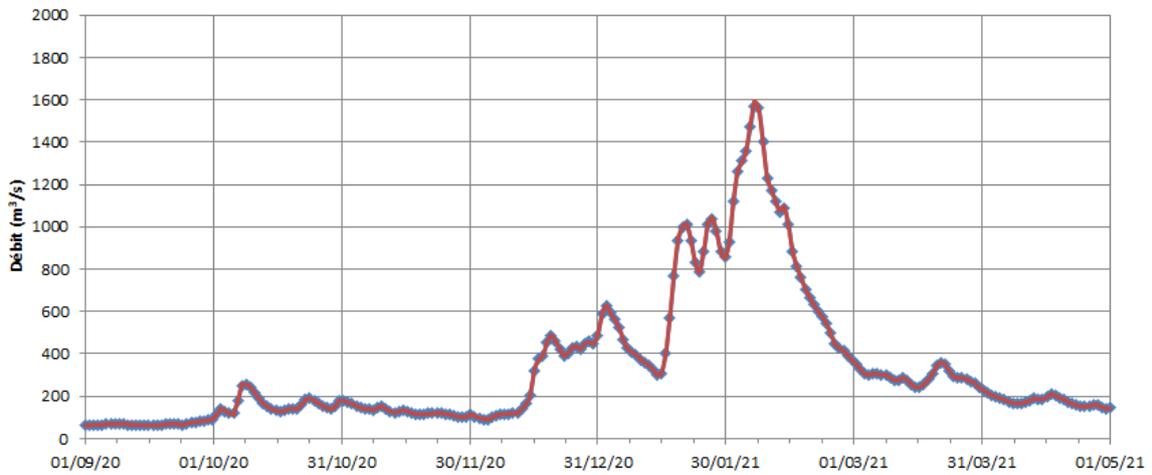


La Vienne à Chinon

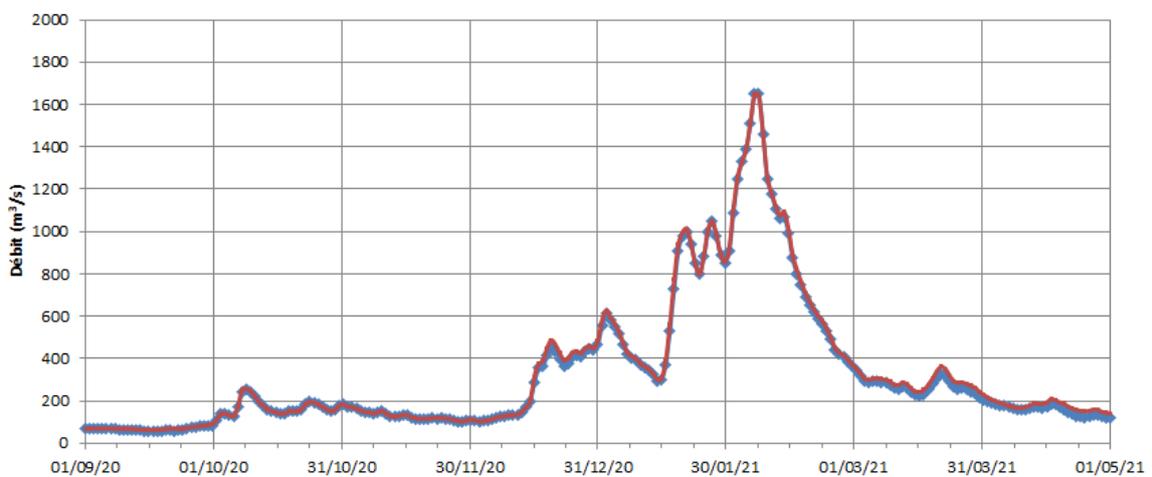
Figure 25 : Débits de la Vienne en différentes stations, mesurés en bleu (banque HYDRO) et simulés en rouge (SYMBIOSE)



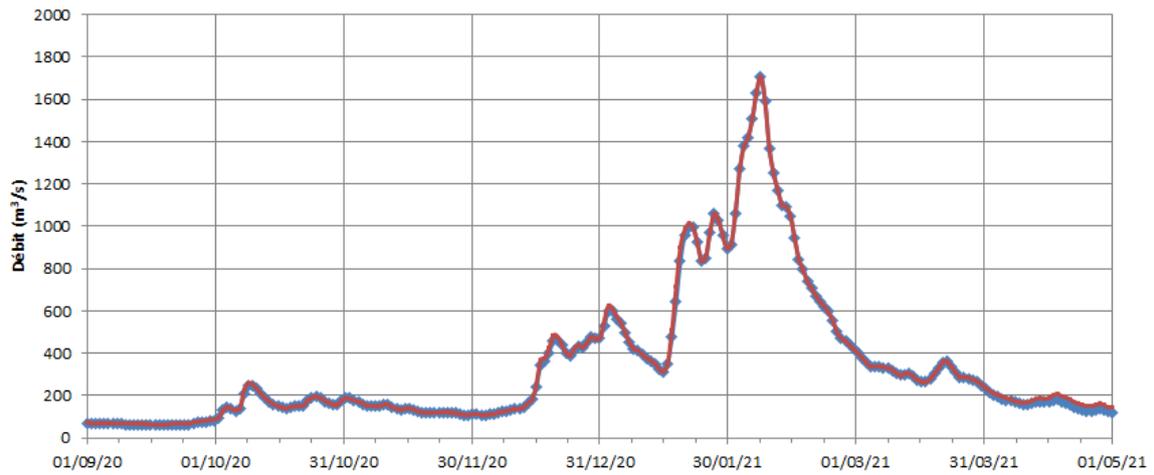
La Loire à Gien



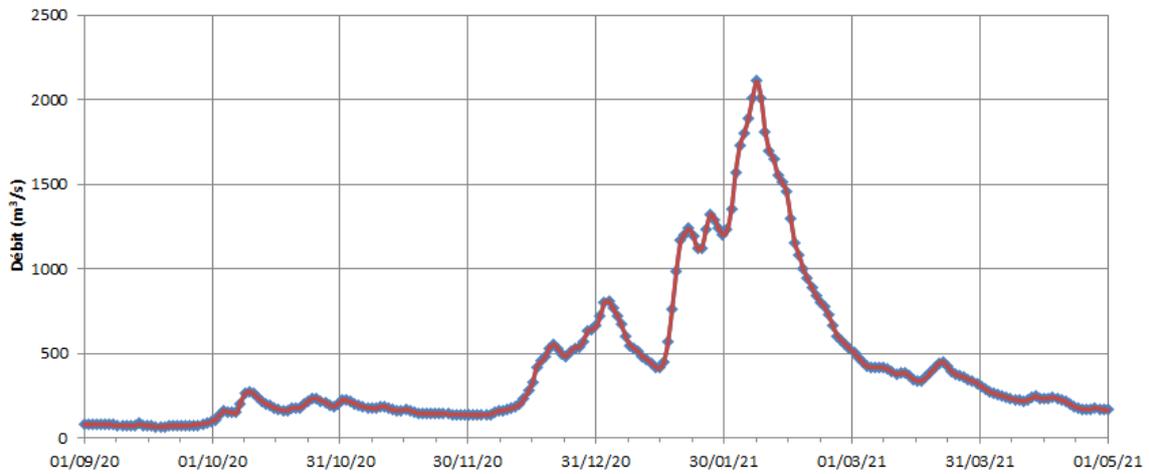
La Loire à Blois



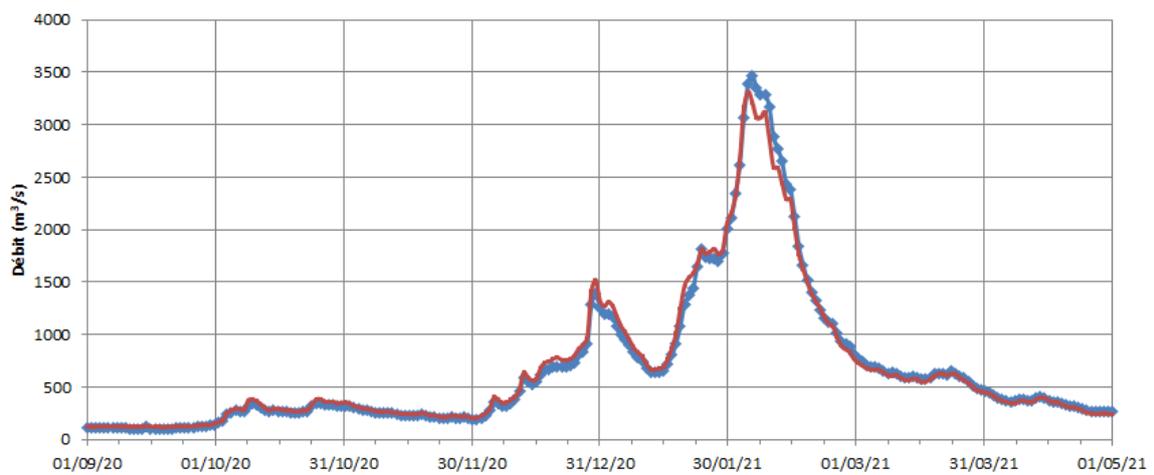
La Loire à Onzain



La Loire à Tours



La Loire à Langeais



La Loire à Saumur

Figure 26 : Débits de la Loire en différentes stations, mesurés en bleu (banque HYDRO) et simulés en rouge (SYMBIOSE)

Rejets de tritium des CNPE

Les données d'entrée relatives aux rejets de tritium nécessaires pour configurer le calcul dans SYMBIOSE sont, pour chaque CNPE, les chroniques de débit de l'effluent rejeté (en m^3/s) et les chroniques de concentration en tritium dans le rejet (en Bq/m^3).

Chaque CNPE envoie mensuellement à l'ASN un registre réglementaire déclarant les rejets liquides du mois échu. Ces derniers contiennent des informations propres à chaque effluent rejeté : la concentration en tritium dans l'effluent préalablement au rejet, le volume rejeté, la date de début et fin de rejet (à la minute près). Un rejet d'effluent pouvant être fractionné, les informations sur le volume et les dates de début et de fin de rejet sont renseignées pour chaque fraction rejetée le cas échéant. Ces registres ont été transmis à l'IRSN pour les 5 CNPE et la durée de la campagne de mesures, de novembre 2020 à avril 2021.

Il est à noter que le CNPE de Chinon envoie à l'ASN un registre des rejets liquides sous un format simplifié depuis le mois de novembre 2020, en tant que site pilote. Dans ce format simplifié, les informations liées aux rejets ne sont plus fournies par effluent liquide rejeté mais intégrées à une échelle mensuelle. Celles-ci sont insuffisantes pour les simulations envisagées dans cette étude, qui visent à représenter l'évolution des concentrations en tritium dans la Loire à une échelle de temps caractéristique infra journalière. Les données manquantes pour le CNPE de Chinon, par effluent liquide rejeté, ont été demandées à EDF, qui les a fournies à l'IRSN pour les besoins de l'étude.

Les données recueillies ont été prétraitées pour fournir les données d'entrée attendues par Symbiose – en particulier les débits de rejet. En effet, ceux-ci ne figurent pas dans les registres de rejet transmis par EDF à l'ASN. Pour effectuer une simulation, on utilise donc le débit de rejet moyen de chaque effluent (ou de la fraction d'effluent quand il est fractionné), calculé en divisant le volume rejeté de l'effluent (ou la fraction de l'effluent le cas échéant) par la durée de son rejet (données déclarées par EDF dans les registres de rejet). L'utilisation de ce débit de rejet moyen fait l'hypothèse que le débit de rejet est constant durant le rejet¹³.

Autres paramètres

Le calcul de transfert en rivière dans SYMBIOSE requiert quelques autres paramètres en plus des paramètres primordiaux que sont les débits et rejets discutés ci-dessus.

Les angles des berges de la Loire (10°) et de la Vienne (80°) ont été établis sur la base des données utilisées dans le rapport IRSN/PSE-ENV/2020-00105 sur l'étude du transfert du tritium en Loire publié sur le site internet de l'IRSN.

Le coefficient de Strickler intervenant dans le modèle est lié à la modélisation des sections transversales et à la rugosité du fond et des berges de la rivière, et impacte notamment la vitesse de l'écoulement : pour des rugosités fortes l'écoulement est ralenti, pour des rugosités faibles, il est accéléré. La sélection de la valeur la plus adaptée du coefficient de Strickler se fait classiquement par calage sur des jeux de données mesurées. Cette valeur impactant la vitesse d'écoulement, elle impacte en particulier le temps d'arrivée des fronts de rejet des différents CNPE en un point donné du cours d'eau. La comparaison en un point des concentrations en tritium simulées aux concentrations mesurées, pour différentes valeurs du coefficient, permet de retenir la valeur minimisant les différences et synchronisant au plus près les fronts (montants et descendants) de concentrations simulés et observés en ce point.

La valeur retenue pour les biefs de la Loire pendant la campagne de mesure a été déterminée en exploitant les mesures au pont Cessart, à la SMP aval de Chinon, mais également à la SMP amont de Chinon. En effet, EDF réalise des prélèvements aliquotes moyens journaliers à la SMP amont de Chinon (tout comme à la SMP aval), sans que ceux-ci ne fassent systématiquement l'objet de mesures (contrairement aux prélèvements de la SMP aval). Sur la durée de la campagne, EDF a transmis à l'IRSN des flacons issus de ces prélèvements aliquotes moyens journaliers et ces derniers ont fait l'objet d'une mesure par l'IRSN de leur concentration en tritium. La valeur de $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ pour le coefficient de Strickler a été retenue car elle permet une bonne synchronisation des fronts de concentration en tritium simulés avec ceux observés avec les mesures à la SMP amont, tout en garantissant également à la SMP aval de Chinon et au pont Cessart une cohérence des résultats simulés et mesurés.

La valeur retenue pour les biefs de la Vienne a été déterminée en exploitant les mesures en rive gauche au pont Cessart - en émettant l'hypothèse que les mesures en rive gauche sont représentatives des concentrations dues aux rejets de Civaux, ce que la suite de l'étude a permis de confirmer. La valeur de $25 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ du coefficient de Strickler pour les biefs de la Vienne

¹³ Lors de la quatrième réunion du Comité de suivi de l'étude, un représentant d'EDF a expliqué qu'un débit de rejet est déterminé à partir de la concentration en tritium dans la bêche de rejet, du débit du fleuve et des concentrations en tritium en amont du point de rejet provenant des CNPE amont ; cette valeur de débit de rejet est atteinte progressivement et ensuite le rejet est constant pendant toute sa durée.

a été retenue car donnant la meilleure synchronisation entre les fronts montant et descendant de la concentration de tritium dus aux rejets du CNPE Civaux selon la simulation et ceux observés sur les mesures du côté rive gauche au pont Cessart.

En toute rigueur, le coefficient de Strickler peut varier le long d'un cours d'eau et dans le temps. Les comparaisons modèle-mesure pendant la campagne s'étant révélées satisfaisantes aux points d'étude (SMP amont et aval du CNPE Chinon et pont Cessart), une valeur unique a été conservée pour l'ensemble des biefs de la Vienne, d'une part, et, de la Loire, d'autre part, pendant toute la période de campagne.

Enfin, les calculs sont menés avec un solveur numérique pour les équations différentielles utilisant un pas de temps fixe de 15 minutes. Le pas de résolution spatiale en rivière est de 250 m, ce qui veut dire que les mailles de calcul élémentaires, dans lesquelles la concentration en tritium est supposée homogène, ont une longueur de 250 m.

Application aux mesures de l'étude préliminaire

En amont de la campagne, la faisabilité des calculs envisagés a été éprouvée sur l'étude préliminaire effectuée du 14 au 18 septembre 2020 (voir chapitre 2.2).

Les figures ci-dessous présentent les résultats des simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène transversalement en aval de chaque point de rejet et en supposant que la Vienne et la Loire sont parfaitement mélangées dès leur confluence.

On y distingue la concentration totale en tritium dans l'eau attendue par la modélisation au niveau du ou des points d'intérêt (courbe rouge – en tenant compte d'un bruit de fond de 1 Bq/L), la contribution des rejets du CNPE de Chinon (courbe noire), de Belleville (courbe jaune), de Dampierre (courbe bleue), de Saint Laurent (courbe verte) et de Civaux pour les points en aval de la confluence de la Vienne et de la Loire (courbe grise). Pour faciliter l'analyse des résultats, la courbe du débit simulé de la Loire (ou de la Vienne pour la figure relative au point P5 sur la Vienne) a été ajoutée (courbe en pointillés bleus).

Ces résultats de simulation peuvent être comparés aux mesures effectuées sur les prélèvements, représentées sur les graphes par les points gris, bleu ou orange.

Au point P0 en amont du CNPE Chinon, la simulation permet d'observer la fin du passage des rejets du CNPE Saint Laurent le 14/09/20 et l'arrivée à partir du 15/09/20 des rejets des CNPE Dampierre et Belleville. Ces mesures ont servi au calage du coefficient de rugosité du fond pour la modélisation. La valeur de $25 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, faisant passer un front montant de concentration du 14 au 16 septembre 2020 s'est avérée la plus compatible avec les mesures des 15 et 16 septembre 2020 au point P0 en amont du CNPE Chinon, tout en donnant des résultats satisfaisants au regard des mesures aux autres points de prélèvement de l'étude préliminaire. Il est à noter que la valeur de ce coefficient est spécifique à cette période de débit très faible, pour lesquelles le profil de la Loire et la rugosité sont particuliers ; il a été revu pour la période de la campagne (voir paragraphe précédent).

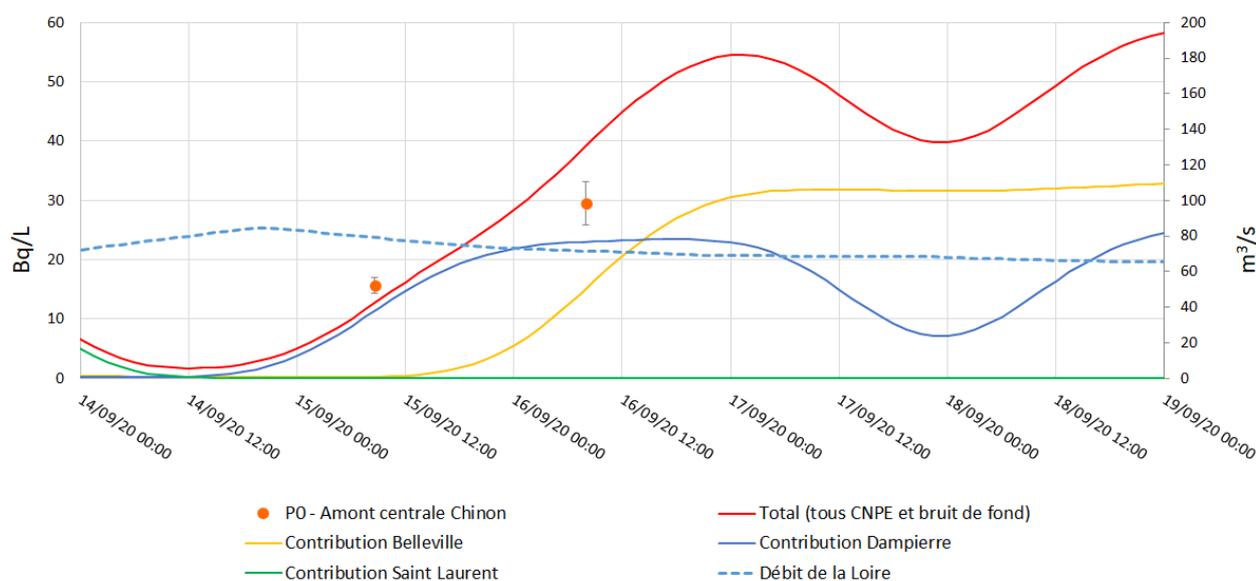


Figure 27 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées en amont de Chinon (P0) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet

En aval immédiat du rejet de Chinon, la confrontation modèle-mesure suggère que le point P1 en rive droite n'est pas dans le panache du CNPE de Chinon, ce qui est cohérent avec le positionnement de la clarinette juste en amont du pont, dans le bras gauche de la Loire (Figure 13). Les mesures au point P2 suggèrent que le point est en bord de panache et le voit parfois passer (le 16/09/20 mais pas le 15/09/20). Lorsque le point est dans le panache, la mesure est cohérente avec un mélange incomplet des rejets sur la largeur, puisque la mesure est bien supérieure à la « concentration de bon mélange » (environ 50 Bq/L) concentration attendue par la simulation pour un mélange complètement homogène sur la largeur de la Loire.

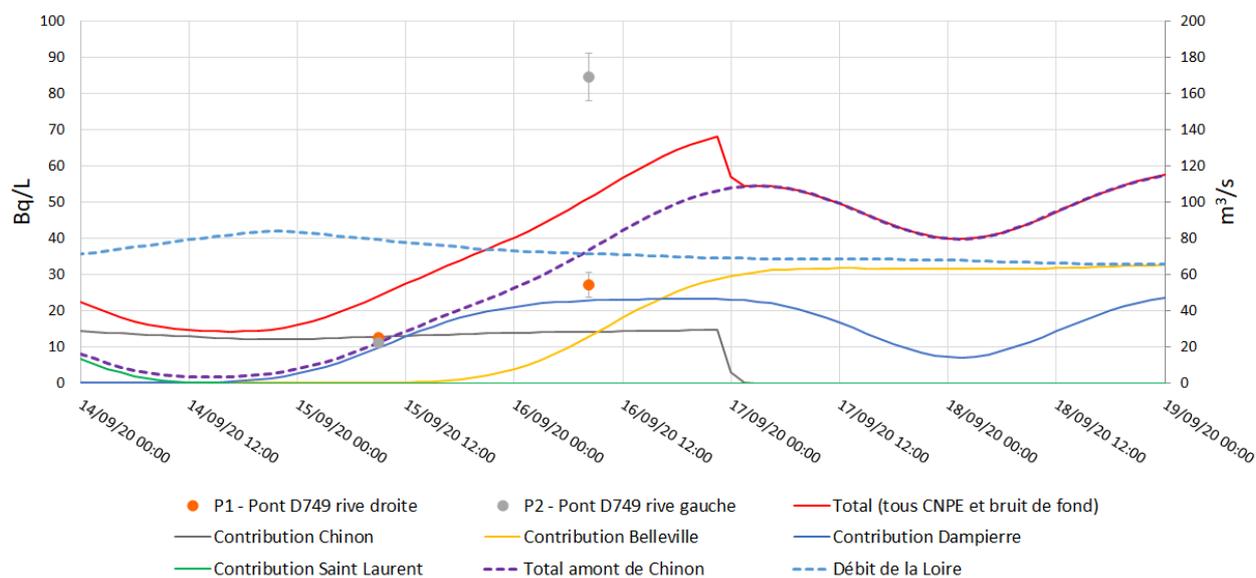


Figure 28 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées en aval de Chinon (P1 / P2) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet

En amont de la confluence Vienne-Loire sur la Loire, les points P3 et P4 (à environ 4,5 km du point de rejet Chinon) semblent hors du panache des rejets de Chinon. Par exemple, les mesures du 15 et 16/09/20 sont du niveau attendu par la modélisation du fait des seuls rejets des CNPE amont de Chinon, ce qui atteste de l'absence du mélange homogène des rejets de Chinon à ce niveau. Il est noté également que le modèle sous-estime les concentrations arrivant des CNPE en amont de Chinon le 17/09/20.

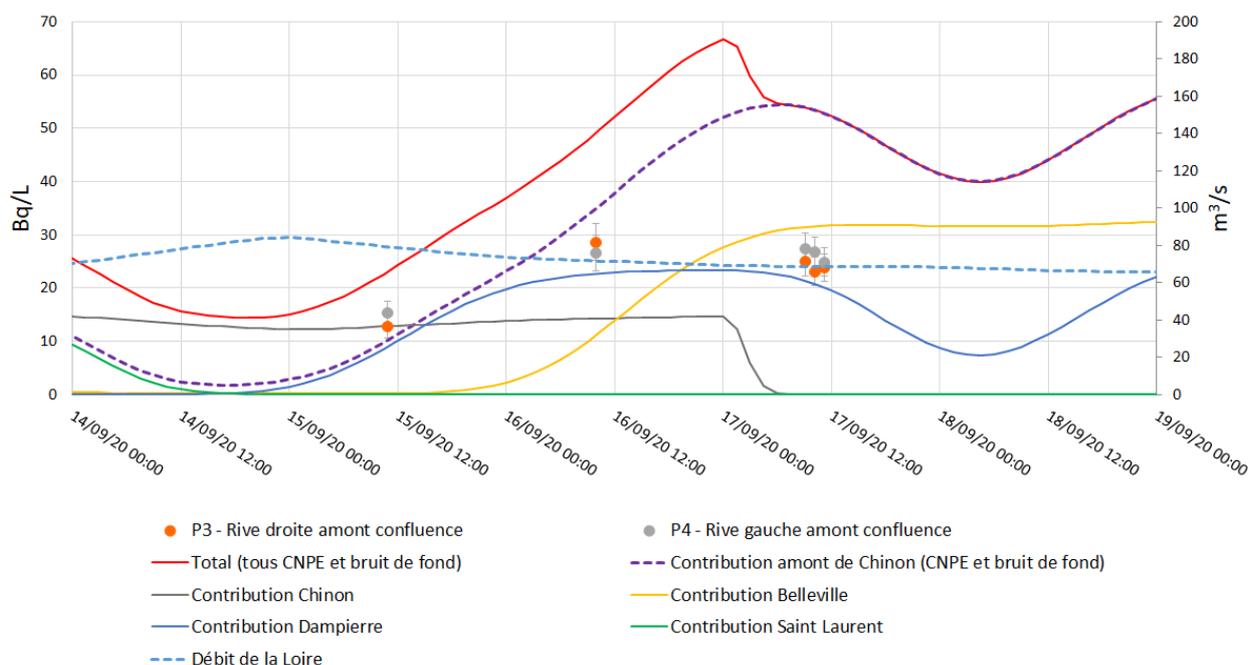


Figure 29 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées sur la Loire en amont de sa confluence avec la Vienne (P3 / P4) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet

En amont de la confluence Vienne-Loire sur la Vienne, les mesures au point P5 sont inférieures à la limite de détection, ce qui est conforme avec les prévisions en raison de l'absence de rejets de tritium par le CNPE de Civaux les jours précédents.

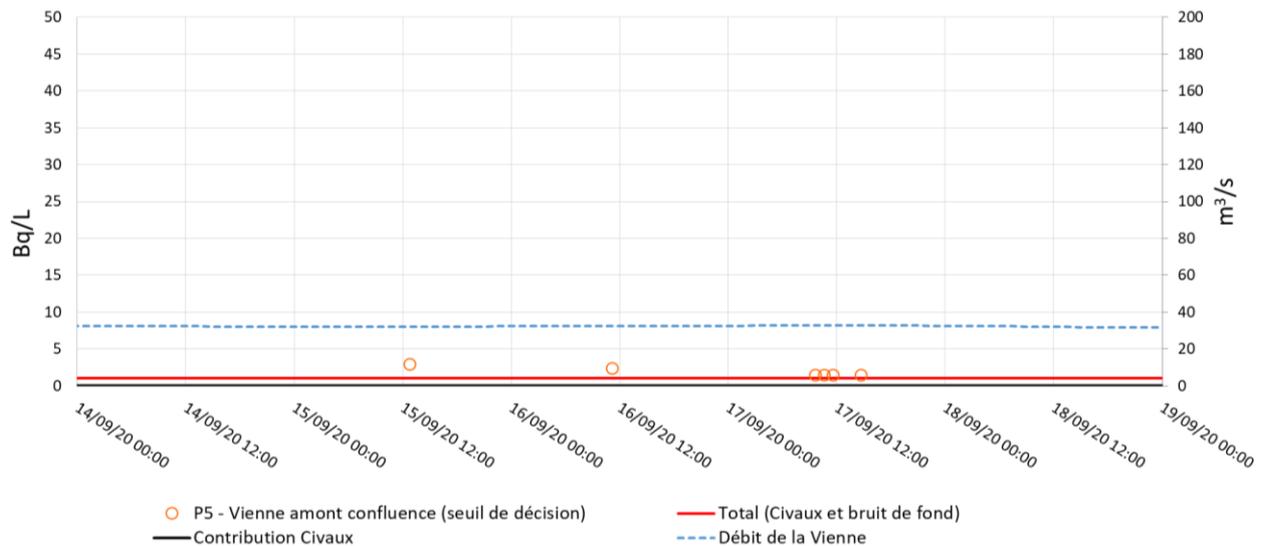


Figure 30 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées sur la Vienne en amont de sa confluence avec la Loire (P5) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet

En aval de la confluence Vienne-Loire, à environ 10 km du point de rejet Chinon, la comparaison modèle-mesure permet d'observer que les rejets des CNPE de la Loire sont visibles au point P6, en rive droite. Elle confirme également que le point P7, en rive gauche, est essentiellement dans des eaux provenant de la Vienne (qui n'apporte pas de tritium à cette date), ne voyant que très peu passer les rejets des CNPE de la Loire.

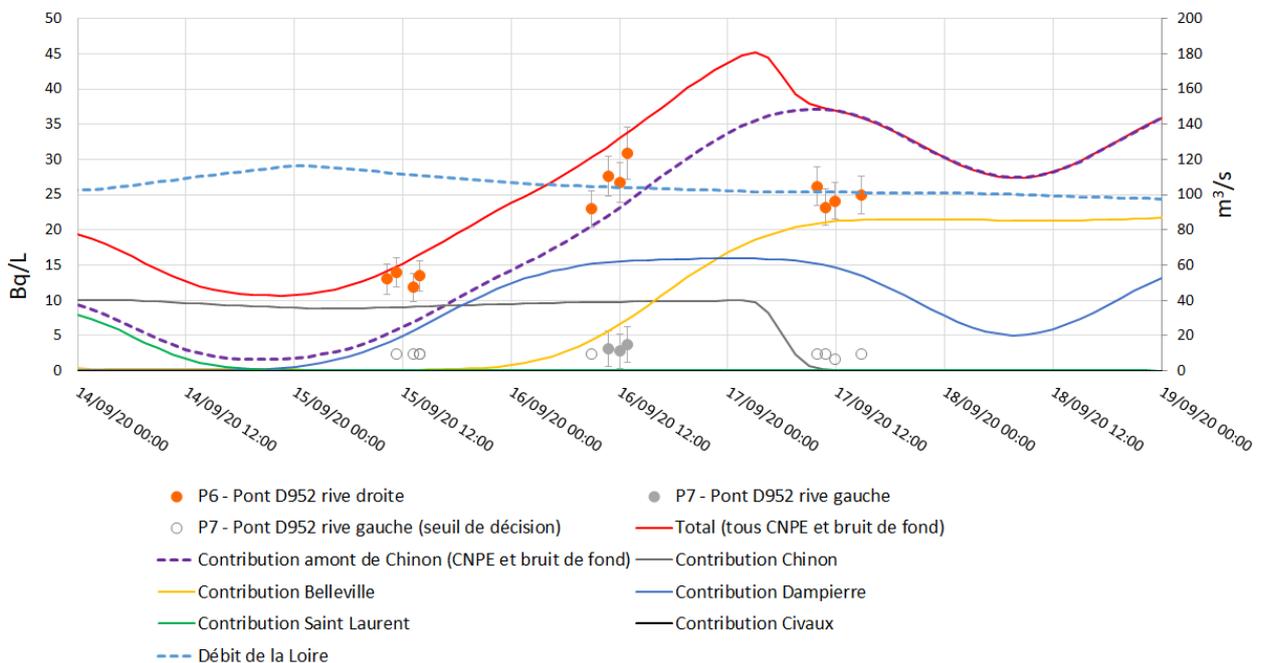


Figure 31 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées en aval de la confluence de la Loire et de la Vienne (P6 / P7) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet et en supposant que la Vienne et la Loire sont parfaitement mélangés dès leur confluence

Au pont Cessart à Saumur, environ 20 km en aval du point de rejet Chinon, les concentrations attendues par la modélisation sont assez proches des mesures du 14 au 16/09/20, quand la dispersion latérale des mesures est assez faible. Pour le

17/09/20, on note que le modèle surestime les concentrations (comme aux points P3 et P4). Les prévisions du modèle sont à nouveau proches des mesures (notamment en rive droite et au milieu du pont) le 18/09/20.

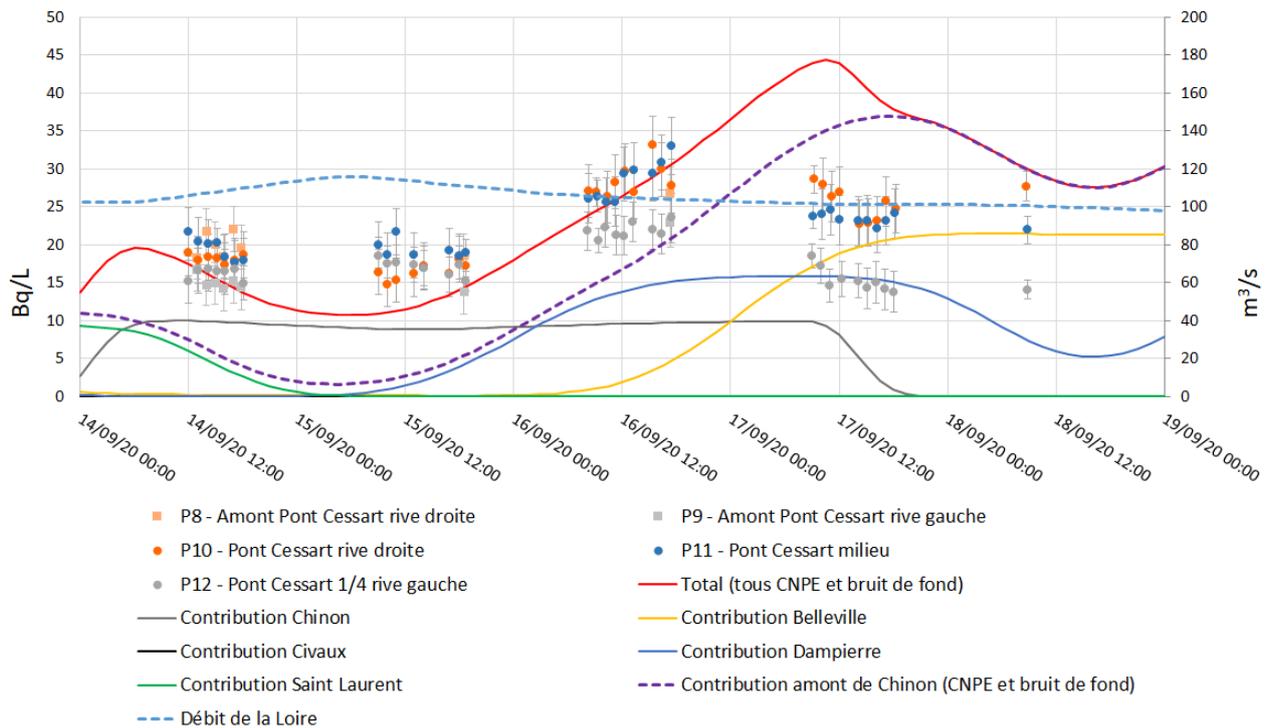


Figure 32 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées sur le pont Cessart (P8 à P12) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet et en supposant que la Vienne et la Loire sont parfaitement mélangés dès leur confluence

Aux points P13 et P14, à Saumur en amont du pont du Cadre Noir, les prédictions du modèle et les mesures (du 14 au 16/09/20) sont cohérentes, comme c'était le cas au pont Cessart.

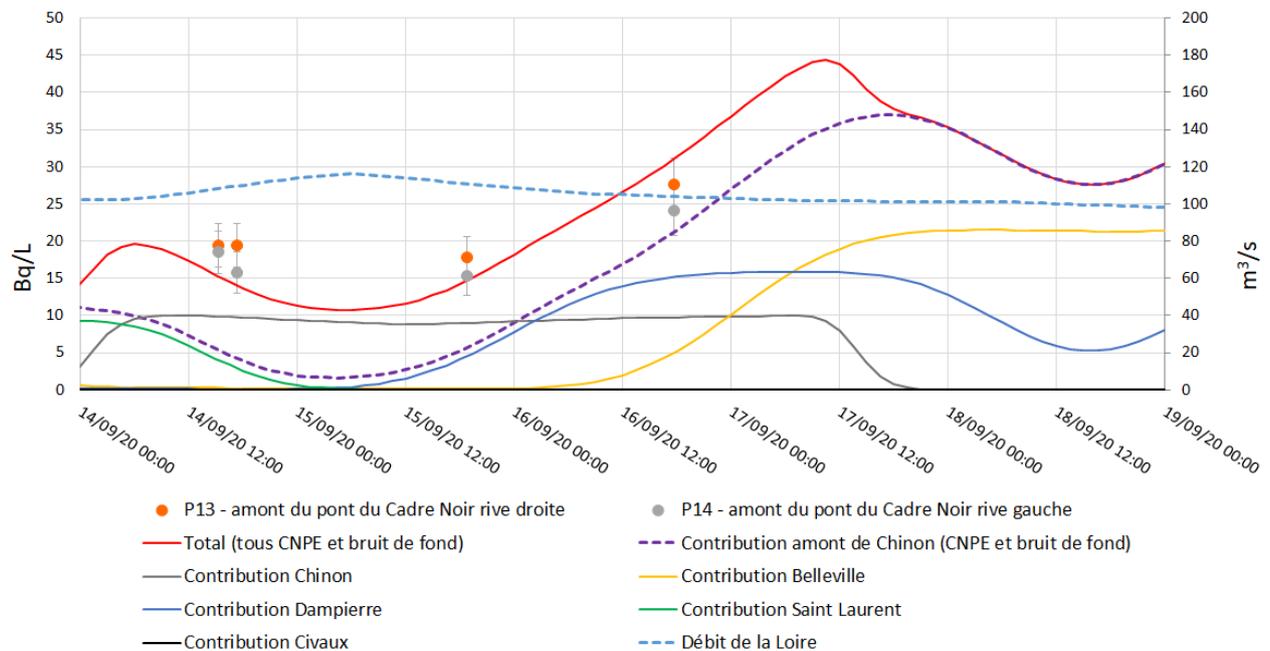


Figure 33 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées sur le pont du Cadre Noir, en aval du pont Cessart (P13 / P14), et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet et en supposant que la Vienne et la Loire sont parfaitement mélangés dès leur confluence

Cet exercice de modélisation mené lors de cette étude préliminaire a permis de valider la méthodologie retenue et de montrer que les simulations peuvent apporter une aide à l'interprétation des mesures, en particulier via l'information sur les contributions respectives attendues des différents CNPE.

Modélisation 2D

Orienté vers l'expertise opérationnelle, le code CASTEAUR 2D applique une approche semi-empirique pour laquelle une étape de calibration à partir de données *in-situ* est fortement conseillée. Pour cette étude, cette phase de calibration a pu s'appuyer sur trois traçages liquides au tritium réalisés par EDF à l'aval du CNPE de Chinon et présentée à la réunion du Comité de suivi du 22 mars 2021.

Ce chapitre présente les paramètres généraux appliqués pour modéliser ces trois campagnes et, pour chacune, précise les conditions générales des traçages et présente les comparaisons modèle-mesure obtenues après calibration des paramètres hydrographiques pour la représentation du cours d'eau, hydrauliques pour la modélisation des débits et des vitesses d'écoulement et radiologiques pour la modélisation des concentrations de tritium.

Le domaine d'étude s'étend du CNPE de Chinon au pont Cessart à Saumur. Pour que les paramétrages soient spécifiques aux conditions hydrauliques de chaque traçage, les biefs, leurs largeurs et leurs longueurs ont été déterminées à partir de vues aériennes fournies par le logiciel Google Earth aux dates qui présentent les conditions de débit les plus proches des campagnes. Le tableau suivant indique les dates des vues Google Earth disponibles au début de l'année 2021 et les conditions de débits données à ces mêmes dates par le site de la banque HYDRO (www.hydro.eaufrance.fr) pour la Loire à Langeais et à Saumur, la Vienne à Chinon et l'Indre à Monts.

Tableau 9 : Conditions de débit associées aux dates des vues aériennes fournies par le logiciel Google Earth

Date Vue Google Earth	Débit Loire (m ³ /s à Langeais)	Débit Vienne (m ³ /s à Chinon)	Débit Loire (m ³ /s à Saumur)	Débit Indre (m ³ /s à Monts)
27/07/2002	130-120		176	
31/12/2002	1220		1680	
24/03/2003	393		594	
31/12/2007	317		492	12
31/12/2008	650		892	13
05/07/2011	63	30,2	97	2,8
12/06/2014	183	87,6	301	12
15/07/2015	86	36,4	126	3,5
22/06/2017	161	37	205	4,2

Sur l'ensemble du domaine et pour tous les traçages, les pentes et les coefficients de Strickler sont déduits de la base de données du code CASTEAUR (Rapport IRSN/PSE-ENV/2020-00105) et les mêmes pas de discrétisation latérale Δy et nombre de sources images NI ont été appliqués.

Tableau 10 : Paramètres de calcul appliqués aux trois campagnes de mesures

Pente (m/m)	Strickler (m ^{1/3} /s)	Δy (m)	NI
4,6.10 ⁻⁴	30	2	5

En complément de ces paramètres, les données spécifiques à chaque traçage sont :

- les données hydrauliques :
 - le débit de la Loire à l'amont du CNPE de Chinon,
 - le débit de la Vienne à l'amont de la confluence avec la Loire,
- Les données de rejet et de concentration en tritium :
 - la concentration en tritium de la Loire à l'amont du CNPE de Chinon,
 - la concentration en tritium de la Vienne à l'amont de la confluence avec la Loire,
 - le débit de rejet aux 11 buses de l'ouvrage de rejet du CNPE.

Calibration sur le traçage EDF du 27 mars 2019

Caractéristiques générales

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques générales de cette campagne :

Tableau 11 : Caractéristiques générales de la campagne du 27 mars 2019

Volume total rejeté	569 m ³
Début - fin du rejet	27/03/2019 00 h 10 – 31/03/2019 23 h 50
Durée du rejet	71 h 33 min
Concentration en tritium dans réservoir KER	2,6 ± 0,4 MBq/L
Durée de la campagne de prélèvements	6 heures (de 10h à 16h)
Débit moyen du rejet KER pendant la campagne	4,4 m ³ /h
Débit moyen mesuré en Loire pendant la campagne	377 m ³ /s
Concentration ajoutée après mélange complet pendant la campagne	8 ± 2 Bq/L
Concentration mesurée à la SMP amont	30 ± 6 Bq/L
CBM attendue en Loire en amont de la Vienne	38 [30 – 46] Bq/L
Concentration mesurée à la SMP aval au moment des prélèvements	23 ± 5 Bq/L
Concentration en Vienne	26 ± 5 Bq/L
Débit moyen mesuré en Vienne le jour de la campagne	105 m ³ /s
CBM attendue en Loire en aval de la Vienne	36 [30 – 42] Bq/L

Les mesures ont été réalisées en 8 sections réparties entre l'amont immédiat du CNPE de Chinon et l'amont du pont de Montsoreau, 9 km à l'aval du CNPE. Ces sections sont localisées sur la figure ci-dessous avec les caractéristiques des prélèvements.

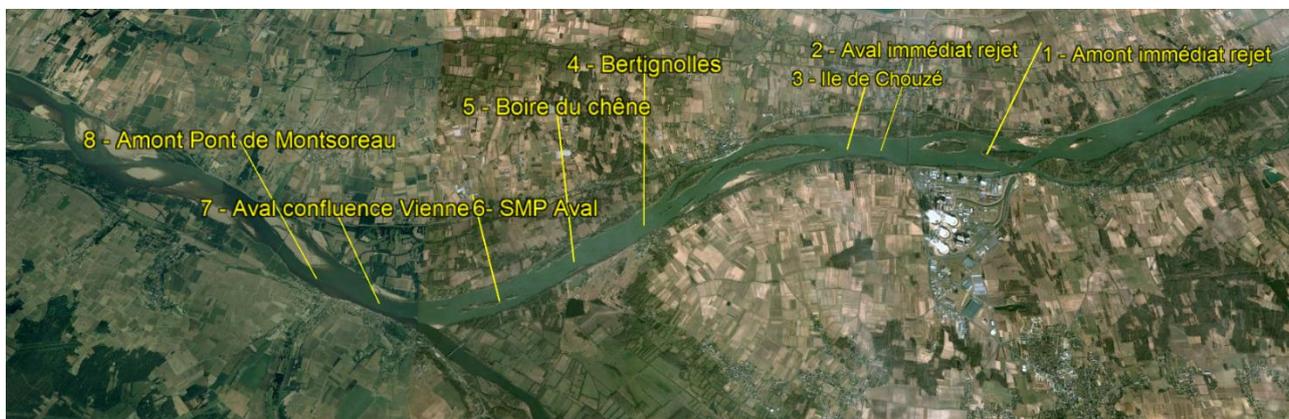


Figure 34 : Localisation des sections de mesure de la campagne du 27 mars 2019

Tableau 12 : Caractéristiques des prélèvements de la campagne du 27 mars 2019

Section	Distance au rejet (km)	Nombre de points	Heures
1 – Amont rejet	- 0,9	5	10 h 00
2 – Aval rejet	0,65	10	10 h 45
3 – Amont Ile Chouzé	1,2	10	11 h 25
4 - Bertignolles	4,2	10	12 h 25
5 – Boire du Chêne	5,2	12	13 h 30
6 – SMP Aval	6,5	10	14 h 00
7 – Aval confluence Vienne	8	10	15 h 15
8 – Amont pont de Montsoreau	9	10	15 h 40

Paramétrage hydrographique

Le paramétrage hydrographique de la Loire entre le CNPE de Chinon et l'amont du pont de Montsoreau a été réalisé à partir de l'image Google Earth du 24/03/2003 qui correspond aux conditions de débit les plus proches de celles de cette campagne (Figure 35). Le domaine est modélisé par les 26 biefs localisés sur la carte ci-dessous :

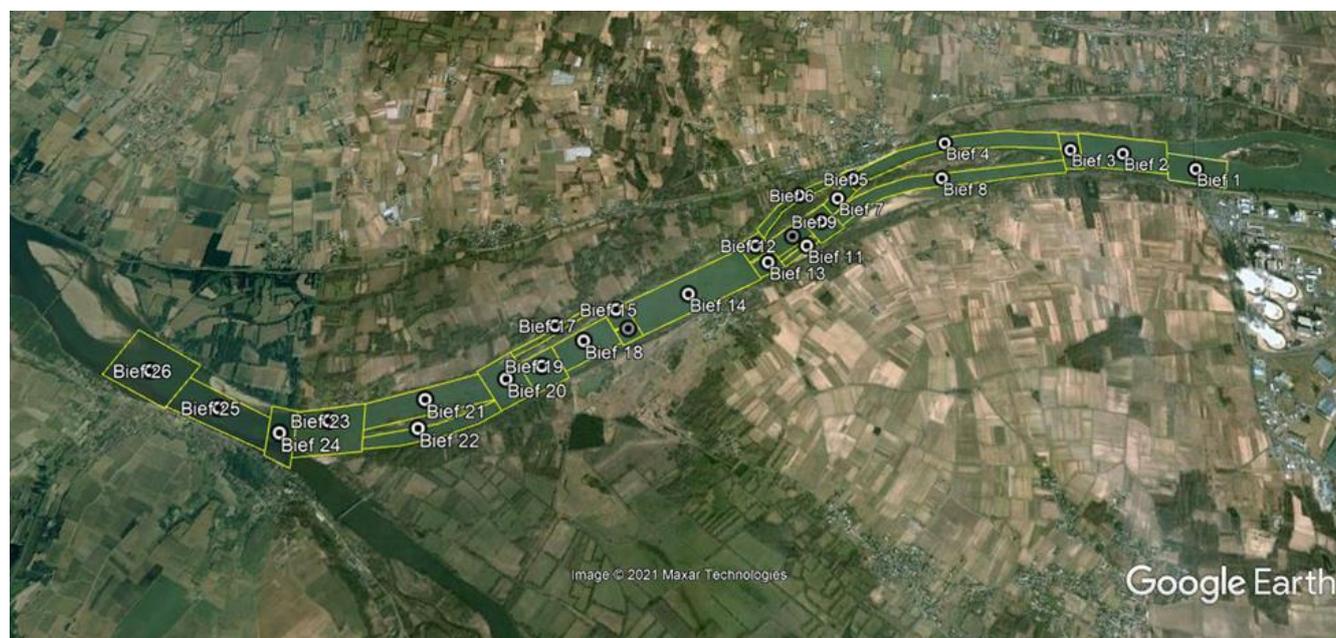


Figure 35 : Biefs de calcul pour la campagne du 27 mars 2019

Les paramètres et les relations de connectivité de ces biefs sont détaillés en annexe 10.4. Le paramètre de diffusion c_y (voir annexe 10.3) est supposé uniforme sur l'ensemble du domaine et les ajustements des profils calculés en fonction des profils mesurés ont conduit à retenir une valeur de 0,2 pour cette campagne. Le profil de concentration réalisé en amont du CNPE de Chinon indique un écart entre les concentrations en rives droite et gauche. Cet écart est pris en compte en décrivant le premier bief par une liaison entrante représentative des conditions en rive droite et un affluent gauche représentatif des conditions en rive gauche.

Paramétrage hydraulique

Le débit de la Loire amont est partagé entre le bras droit et le bras gauche de l'île située en face du CNPE de Chinon. Ce partage est déterminé en ajustant le profil de concentration calculé au profil mesuré au niveau de l'aval immédiat du rejet. Ce fractionnement concerne le débit de la liaison entrante du bief 1 et de l'affluent droit du bief 2. A ces débits sont ajoutés les apports de l'Indre par l'affluent gauche du bief 1 et de la Vienne par l'affluent gauche du bief 24.

Tableau 13 : Apports de débit aux affluents et aux liaisons entrantes pour la campagne du 27 mars 2019

Nom	Q _{affluent_droit} (m ³ /s)	Q _{liaison_entrante} (m ³ /s)	Q _{affluent_gauche} (m ³ /s)	Q _{défluent_droit} (m ³ /s)	Q _{défluent_gauche} (m ³ /s)
Bief 1	0	190	10	0	0
Bief 2	177	0	0	0	0
Bief 24	0	0	105	0	0

Sur l'ensemble du domaine, le fractionnement des débits sortants des biefs est réalisé au prorata des largeurs des liaisons sortantes.

Paramétrage des sources de tritium

Le scénario du traçage implique trois sources de tritium :

1. les concentrations côtés gauche et droite à l'amont du CNPE de Chinon ;
2. la concentration de la Vienne avant sa confluence avec la Loire ;
3. les rejets aux 11 buses de la clarinette du CNPE de Chinon.

Les premières sources sont assimilées aux bruits de fond à la liaison entrante et à l'affluent gauche du bief 1 et à l'affluent droit du bief 2 et la seconde est associée à l'affluent gauche du bief 24.

Tableau 14 : Bruits de fond des concentrations en tritium pour la campagne du 27 mars 2019

Nom	Affluent droit (Bq/L)	Liaison entrante (Bq/L)	Affluent gauche (Bq/L)
Bief 1	0	30	20
Bief 2	30	0	0
Bief 24	0	0	26

Le rejet du CNPE de Chinon est supposé uniformément distribué entre les 11 buses de la clarinette de rejet située à l'entrée du Bief 1. Ces 11 buses sont réparties tous les 5 m, à partir de 100 m de la rive gauche, avec chacune un débit de rejet de $3,94 \cdot 10^5$ Bq/s.

Comparaisons modèle-mesure

Les graphiques ci-dessous présentent la comparaison modèle-mesure aux différentes sections de mesure de la campagne du 27 mars 2019. A la SMP aval, la rupture de continuité des courbes s'explique par la présence d'une île.

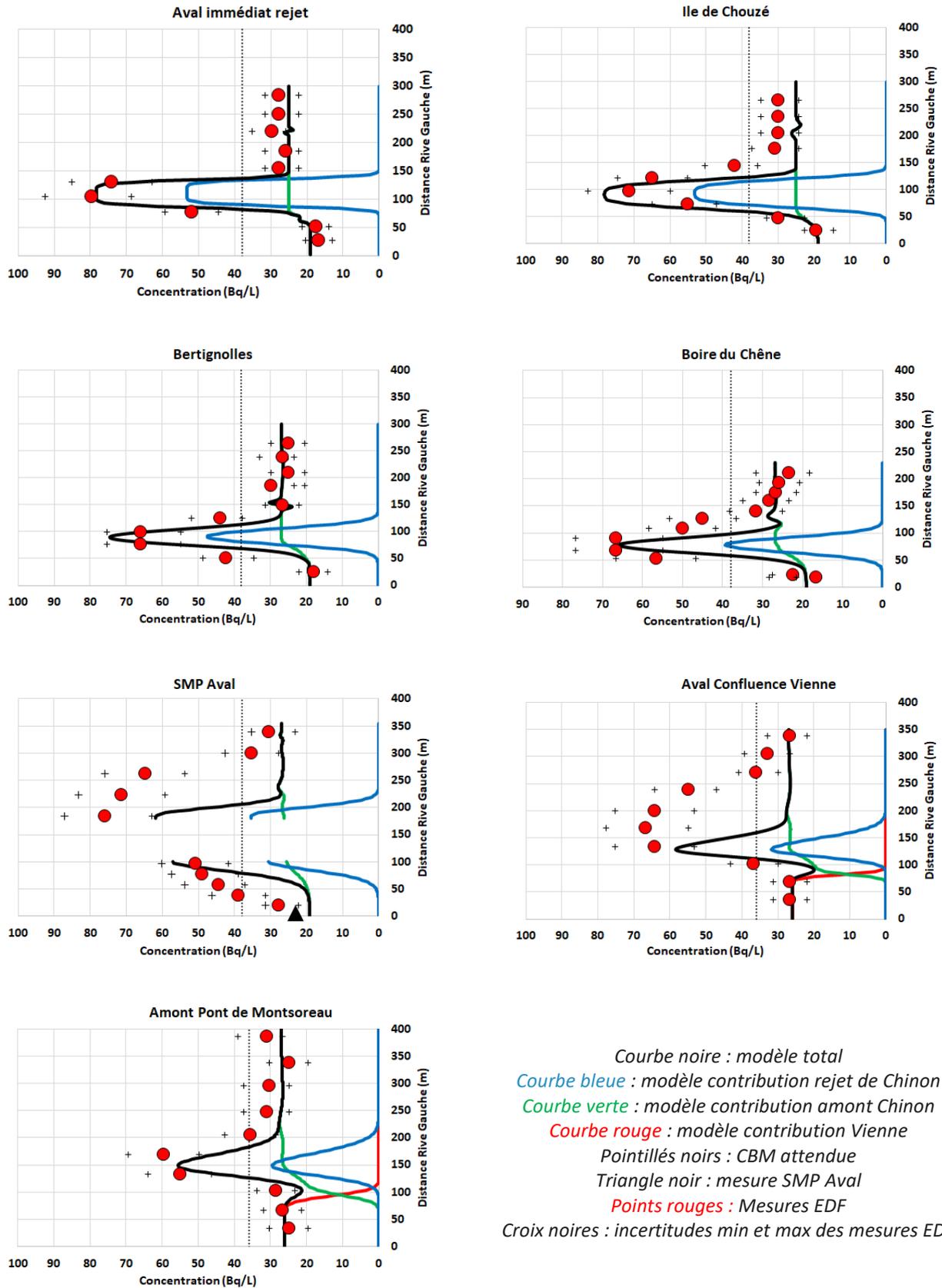


Figure 36 : Comparaison modèle-mesure pour la campagne du 27 mars 2019¹⁴

¹⁴ Certains graphiques peuvent présenter une légère différence avec ceux présentés en Comité de suivi le 28 juin 2021 suite à l'ajustement du positionnement de certains points de mesures.

Ces résultats montrent un bon accord modèle-mesure jusqu'à Boire du Chêne. Au-delà, les mesures sont marquées à la fois par une forte diffusion apparente en rive droite et des niveaux maximums qui sont proches voir supérieurs à ceux observés à Boire du Chêne. Le modèle ne peut reproduire ces profils sauf à appliquer localement des paramètres de diffusion hors normes (annexe 10.3) qui auraient pour conséquence de fortement diminuer les valeurs maximales. Cet effet, probablement imputable à des conditions d'écoulement particulières entre Boire du chêne et la SMP aval, persiste jusqu'à l'aval de la confluence avec la Vienne. Il semble s'estomper au niveau du pont de Montsoreau où le modèle retrouve un bon accord avec le profil mesuré.

La SMP aval du CNPE de Chinon détecte le bord gauche du panache où les concentrations sont inférieures d'un facteur deux à la CBM attendue et équivalentes aux contributions en provenance de l'amont du CNPE de Chinon. Le pic du panache est situé au niveau de la rive gauche du bras droit de l'île située au droit de la SMP.

Calibration sur le traçage EDF du 24 juin 2020

Cette campagne a été réalisée pour des conditions de débit de la Loire proches de la précédente. Elle se distingue par l'absence de contributions du CNPE de Civaux et des CNPE amont à Chinon et par un domaine de suivi qui s'étend jusqu'au pont Cessart à Saumur.

Caractéristiques générales

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques générales de cette campagne :

Tableau 15 : Caractéristiques générales de la campagne du 24 juin 2020

Volume total rejeté	505 m ³
Début - fin du rejet	23/06/2020 22 h 23 – 25/06/2020 10 h 04
Durée du rejet	35 h 41 min
Concentration en tritium dans réservoir KER	1,2 ± 0,2 MBq/L
Durée de la campagne de prélèvements	7 h (de 9 h 00 à 15 h 55)
Débit moyen du rejet KER pendant la campagne	14,2 m ³ /h
Débit moyen mesuré en Loire pendant la campagne	346 m ³ /s
Concentration ajoutée après mélange complet pendant la campagne	14 ± 4 Bq/L
Concentration mesurée à la SMP amont	< seuil de décision
CBM attendue en Loire en amont de la Vienne	16 [10 – 21] Bq/L
Concentration mesurée à la SMP aval au moment des prélèvements	5 ± 3 Bq/L
Concentration en Vienne	< seuil de décision
Débit moyen mesuré en Vienne le jour de la campagne	57 m ³ /s
CBM attendue en Loire en aval de la Vienne	13,5 [30 – 42] Bq/L

Les mesures ont été réalisées à 6 sections réparties entre l'amont immédiat du CNPE et l'aval du pont Cessart à Saumur à environ 20 km à l'aval du CNPE.



Figure 37 : Localisation des sections de mesure de la campagne du 24 juin 2020

Tableau 16 : Caractéristiques des prélèvements de la campagne du 24 juin 2020

Section	Distance au rejet (km)	Nombre de points	Heures
1 – Amont des rejets	- 0,9	5	09 h 00 – 09 h 10
2 – Aval immédiat des rejets	0,65	10 en surface 10 en profondeur	09 h 25 – 09 h 45
3 – SMP Aval	6,5	10 en surface 10 en profondeur	10 h 20 – 11 h 00
4 – Amont pont de Montsoreau	9	10 en surface 10 en profondeur	11 h 10 – 11 h 25
5 – Saumur – « Le petit Puy » Amont STEP	18	10 en surface 10 en profondeur	14 h 20 – 14 h 35
6 – Aval du pont Cessart	20,5	10 en surface 10 en profondeur	14 h 50 – 15 h 55

Paramétrage hydrographique

Le paramétrage hydrographique de la Loire entre le CNPE de Chinon et le pont Cessart à Saumur a été réalisé à partir de l'image Google Earth du 24/03/2003 qui correspond aux conditions hydrauliques les plus proches de celles de cette campagne. Le domaine est modélisé par les 52 biefs localisés sur la figure ci-dessous :

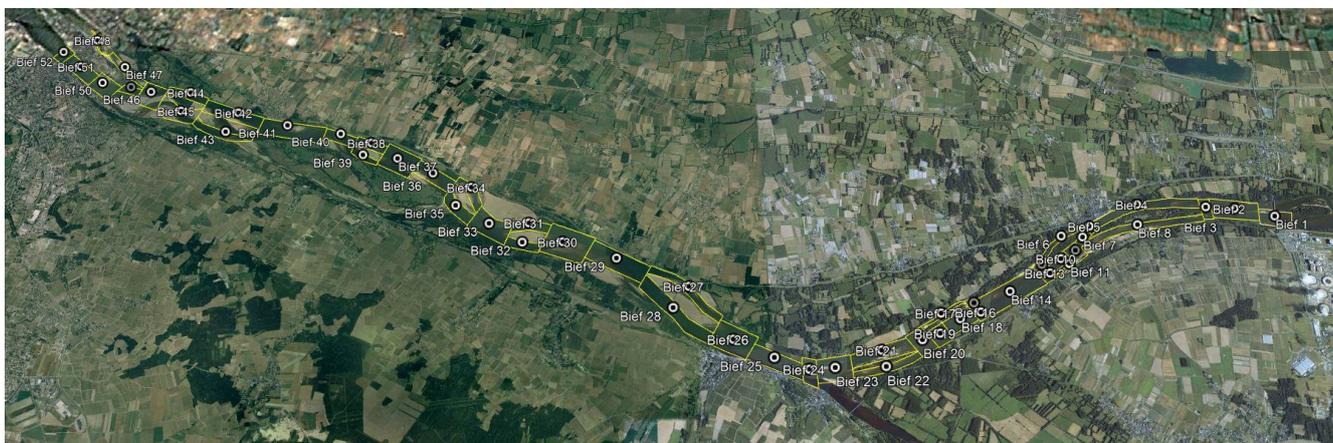


Figure 38 : Biefs de calcul pour la campagne du 24/06/2020

Les paramètres des biefs de calcul et leurs relations de connectivité sont détaillés en annexe 10.4, en notant que les 26 premiers biefs sont identiques à ceux de la campagne du 27/03/2019. Sur l'ensemble du domaine, la calibration du coefficient de diffusion cy aboutit également à la valeur 0,2.

Paramétrage hydraulique

Le débit de la Loire amont est partagé entre le bras droit et le bras gauche de l'île située en face du CNPE de Chinon. Ce partage est déterminé en ajustant le profil de concentration calculé au profil mesuré au niveau de l'aval immédiat du rejet. Ce fractionnement concerne le débit de la liaison entrante du bief 1 et de l'affluent droit du bief 2. A ces débits sont ajoutés les apports de l'Indre par l'affluent gauche du bief 1 et de la Vienne par l'affluent gauche du bief 24.

Tableau 17 : Apports de débit aux affluents et aux liaisons entrantes pour la campagne du 24 juin 2020

Nom	Q _{affluent_droit} (m ³ /s)	Q _{liaison_entrante} (m ³ /s)	Q _{affluent_gauche} (m ³ /s)	Q _{défluent_droit} (m ³ /s)	Q _{défluent_gauche} (m ³ /s)
Bief 1	0	160	10	0	0
Bief 2	176	0	0	0	0
Bief 24	0	0	105	0	0

Le fractionnement des débits sortants des biefs est réalisé de façon automatique au prorata des largeurs des liaisons sortantes.

Paramétrage des sources de tritium

Le scénario implique trois sources de tritium : 1) les concentrations à l'amont du CNPE de Chinon, 2) la concentration de la Vienne avant sa confluence avec la Loire et 3) les rejets aux 11 buses de la clarinette du CNPE de Chinon. Les deux premières sources sont assimilées aux bruits de fond à l'entrée et à l'affluent gauche du bief 1 et de l'affluent du bief 2.

Tableau 18 : Bruits de fond des concentrations en tritium pour la campagne du 24 juin 2020

Nom	Affluent droit (Bq/L)	Liaison entrante (Bq/L)	Affluent gauche (Bq/L)
Bief 1	0	2	2
Bief 2	2	0	0
Bief 24	0	0	2

Le rejet du CNPE de Chinon est supposé uniformément distribué entre les 11 buses de la clarinette de rejet située à l'entrée du Bief 1. Ces 11 buses sont réparties tous les 5 m, à partir de 100 m de la rive gauche, avec chacune un débit de rejet de $4,30 \cdot 10^5$ Bq/s.

Comparaisons modèle-mesure

Les graphiques ci-dessous présentent la comparaison modèle-mesure aux différentes sections de mesure de la campagne du 24 juin 2020 :

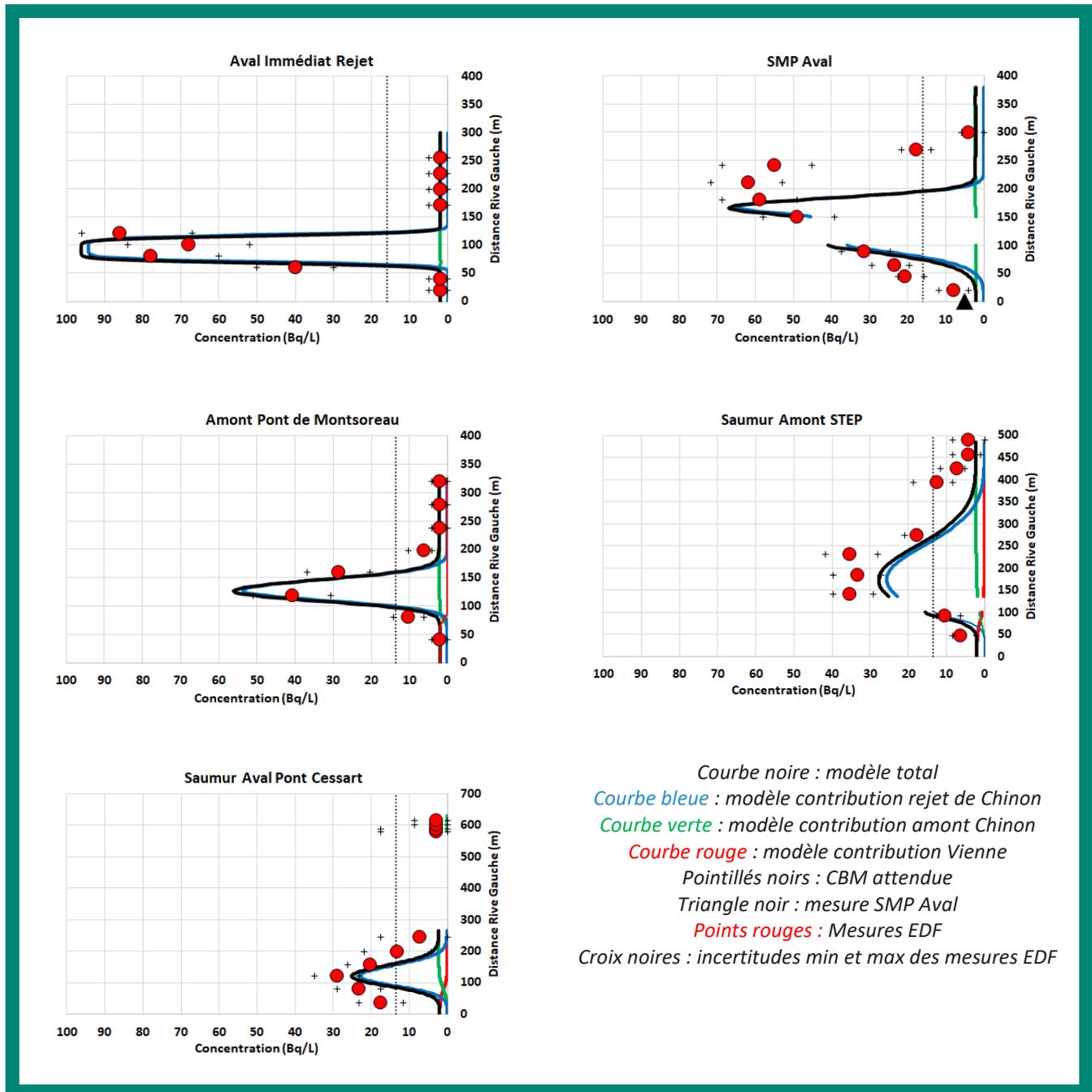


Figure 39 : Comparaison modèle-mesure pour la campagne du 24 juin 2020

L'accord modèle-mesure est correct à l'aval immédiat du rejet. Au niveau de la SMP, le phénomène de forte diffusion latérale de la partie gauche du panache observé lors de la campagne précédente apparaît à nouveau. En pratique, il n'est pas possible de reproduire cet étalement par un forçage local de la diffusion car cette démarche se traduirait par des coefficients de diffusion hors normes et un abaissement du pic incompatible avec les observations. Un bon accord modèle-mesure est à nouveau obtenu plus en aval à partir de Montsoreau.

Comme pour la campagne précédente, la SMP ne détecte que le bord gauche du panache où la concentration est inférieure d'un facteur 2 à la CBM attendue et équivalente aux contributions en provenance de l'amont du CNPE de Chinon. Le pic passe de l'autre côté de l'île.

À Saumur, les conditions d'un mélange homogène ne sont pas atteintes et le pic se situe au milieu du pont. Les points situés au-delà de 500 m de la rive gauche sont situés dans le bras droit de l'île d'Offard qui explique la discontinuité des courbes entre 280 et 580 m.

Calibration sur le traçage EDF du 25 octobre 2017

Cette campagne se distingue des deux précédentes par les conditions de débit de la Loire qui sont à l'étiage.

Caractéristiques générales

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques générales de cette campagne :

Tableau 19 : Caractéristiques générales de la campagne du 25 octobre 2017

Volume total rejeté	648 m ³
Début - fin du rejet	24/10/2017 23h19 – 28/10/2017 19h26
Durée du rejet	87 h 39
Concentration en tritium dans réservoir KER	1,2 ± 0,05 MBq/L
Durée de la campagne de prélèvements	8 heures (de 10h10 à 18h10)
Débit moyen du rejet KER pendant la campagne	7,1 m ³ /h
Débit moyen mesuré en Loire pendant la campagne	95 m ³ /s
Concentration ajoutée après mélange complet pendant la campagne	25 ± 4 Bq/L
Concentration mesurée à la SMP amont	17 ± 4 Bq/L
CBM attendue en Loire en amont de la Vienne	42 [34 – 50] Bq/L
Concentration mesurée à la SMP aval au moment des prélèvements	45 ± 7 Bq/L
Concentration en Vienne	< seuil de décision
Débit moyen mesuré en Vienne le jour de la campagne	38 m ³ /s
CBM attendue en Loire en aval de la Vienne	30 [24 – 36] Bq/L

Les mesures ont été réalisées aux mêmes sections que celles de la campagne du 27/03/2019. Il s'agit de 8 sections réparties entre l'amont immédiat du CNPE et l'amont du pont de Montsoreau, 9 km à l'aval.

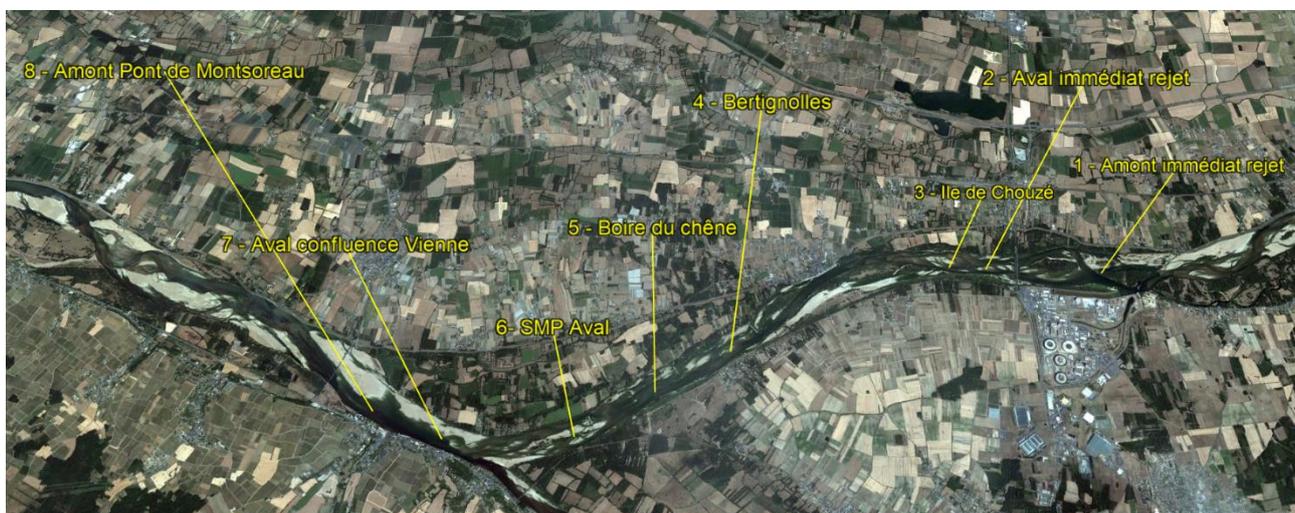


Figure 40 : Localisation des sections de mesure de la campagne du 25 octobre 2017

Tableau 20 : Caractéristiques des prélèvements de la campagne du 25 octobre 2017

Section	Distance au rejet (km)	Nombre de points	Heures
1 – Amont rejet	-0,9	5	10 h 10 – 10 h 20
2 – Aval rejet	0,65	10	10 h 55 – 11 h 25
3 – Amont Ile Chouzé	1,2	10	12 h 00 – 13 h 05
4 - Bertignolles	4,2	10	14 h 05 – 14 h 25
5 – La Boire du Chêne	5,2	12	14 h 55 – 15 h 25
6 – SMP Aval	6,5	10	15 h 45 – 16 h 45
7 – Aval confluence Vienne	8	10	17 h 10 – 17 h 35
8 – Amont pont de Montsoreau	9	10	17 h 50 – 18 h 10

Paramétrage hydrographique

Compte tenu des conditions de débit du 25 octobre 2017, le paramétrage hydrographique de la Loire entre le CNPE de Chinon et l'amont du pont de Montsoreau, 9 km à l'aval, a été réalisé à partir de l'image Google Earth du 15/07/2015 qui correspond aux conditions de débit les plus proches de celles de cette campagne (Figure 41). Le domaine est modélisé par les 24 biefs présentés sur la carte ci-dessous :



Figure 41 : Biefs de calcul pour la campagne du 25 octobre 2017

Alors que la longueur du domaine est identique à celle des campagnes de 2019 et 2020, les largeurs s'avèrent plus petites en raison de la diminution du débit. L'ajustement du paramètre de diffusion c_y conduit cette fois à une valeur de 0,7, nettement différente de celle des deux autres campagnes. Les paramètres de ces biefs et leurs relations de connectivité sont détaillés en annexe 10.4.

Paramétrage hydraulique

Les apports de débit aux affluents et aux liaisons entrantes concernent les deux premiers biefs pour le débit de la Loire et le bief 22 pour le débit de la Vienne.

Tableau 21 : Apports de débit aux affluents et aux liaisons entrantes pour la campagne du 25 octobre 2017

Nom	Q affluent droit (m ³ /s)	Q liaison entrante (m ³ /s)	Q affluent gauche (m ³ /s)	Q défluent droit (m ³ /s)	Q défluent gauche (m ³ /s)
Bief 1	0	60	0	0	0
Bief 3	37	0	0	0	0
Bief 22	0	0	38	0	0

Le fractionnement des débits sortants des biefs est réalisé de façon automatique au prorata des largeurs des liaisons sortantes.

Paramétrage des sources de tritium

Le scénario implique trois sources de tritium : 1) les concentrations à l'amont du CNPE de Chinon, 2) la concentration de la Vienne avant sa confluence avec la Loire et 3) les rejets aux 11 buses de la clarinette du CNPE de Chinon. Les deux premières sources sont assimilées à des bruits de fond détaillés ci-dessous.

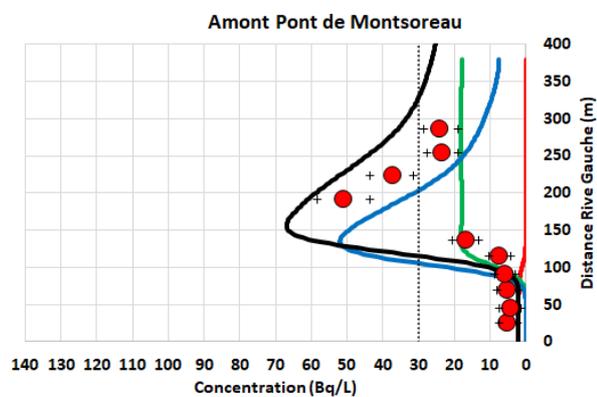
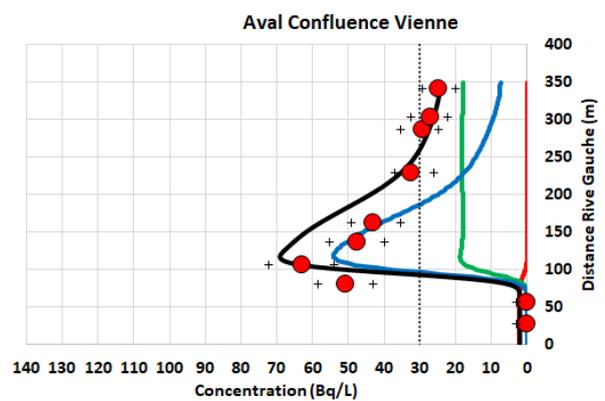
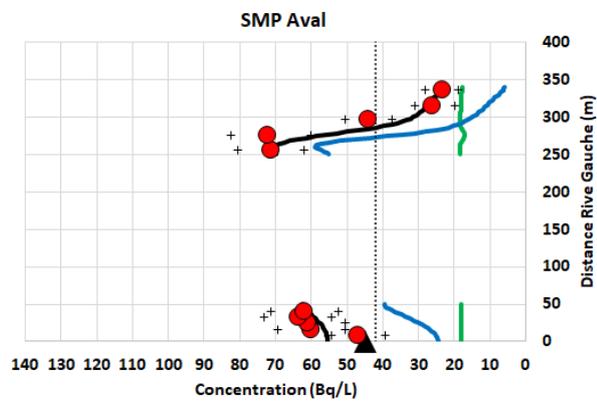
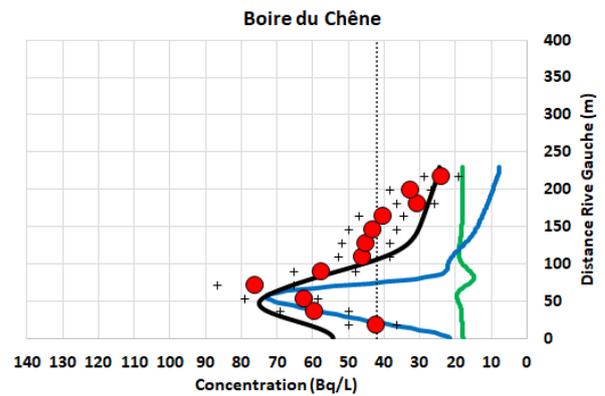
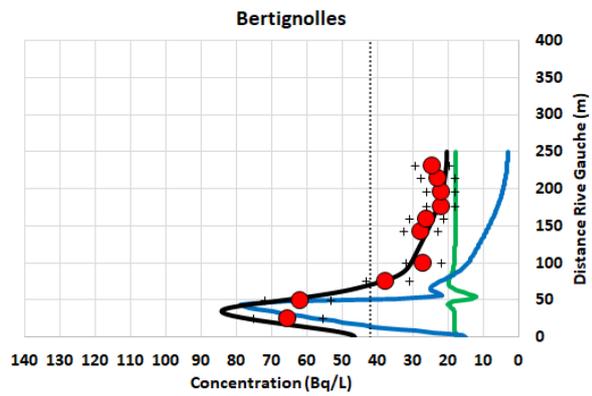
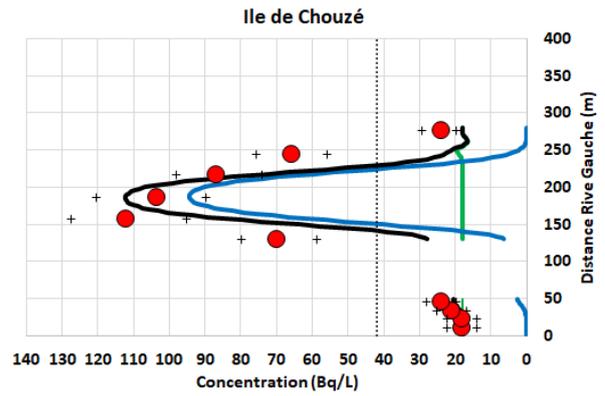
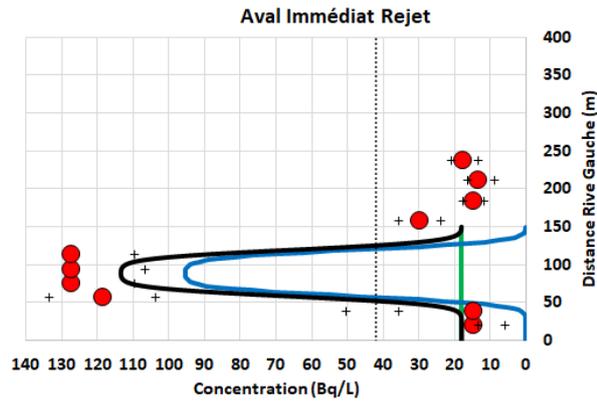
Tableau 22 : Bruits de fond des concentrations en tritium pour la campagne du 25 octobre 2017

Nom	Affluent droit (Bq/L)	Liaison entrante (Bq/L)	Affluent gauche (Bq/L)
Bief 1	0	18	0
Bief 3	18	0	0
Bief 22	0	0	2

Le rejet du CNPE de Chinon est supposé uniformément distribué entre les 11 buses de la clarinette de rejet située à l'entrée du Bief 1. Ces 11 buses sont réparties tous les 5 m, à partir de 30 m de la rive gauche, avec chacune un débit de rejet de $1,79 \cdot 10^{-4}$ Bq/s.

Comparaisons modèle-mesure

Les graphiques ci-dessous présentent la comparaison modèle-mesure aux différentes sections de mesure de la campagne du 25 octobre 2017 :



Courbe noire : modèle total
 Courbe bleue : modèle contribution rejet de Chinon
 Courbe verte : modèle contribution amont Chinon
 Courbe rouge : modèle contribution Vienne
 Pointillés noirs : CBM attendue
 Triangle noir : mesure SMP Aval
 Points rouges : Mesures EDF
 Croix noires : incertitudes min et max des mesures EDF

Figure 42 : Comparaison modèle-mesure pour la campagne du 25 octobre 2017

L'accord modèle-mesure est satisfaisant sur l'ensemble du domaine modélisé. Par rapport aux deux autres campagnes, l'effet diffusif en rive gauche entre Bertignolles et la SMP est atténué, ce qui se traduit par la stabilité du profil de concentration entre Bertignolles et Boire du Chêne. La mesure à la SMP est cette fois représentative de la CBM qui s'accorde avec la concentration du bord gauche du panache. Néanmoins, le pic du panache reste localisé de l'autre côté de l'île située au droit de la station.

Ce résultat confirme les résultats des modélisations 1D (rapport IRSN/PSE-ENV/2020-00105) qui avaient montré une meilleure représentativité de la SMP aux faibles débits et l'explique par le rétrécissement de l'écoulement qui accélère l'homogénéisation latérale du panache avec pour conséquence, au niveau de la SMP, d'augmenter les concentrations au niveau de la berge gauche où se situe le prélèvement.

Synthèse de la calibration à partir des traçages EDF

À l'exception de quelques particularités locales qui n'affectent pas les tendances générales, cette analyse montre que les trois campagnes de traçage réalisées par EDF permettent d'obtenir une calibration satisfaisante du modèle 2D pour des conditions de débit comprises entre 100 et 400 m³/s.

Le mélange transversal est plus rapide pour la campagne du 25 octobre 2017, qui est la campagne à plus faible débit. A priori non intuitif, ce comportement s'explique par le rétrécissement de la largeur de l'écoulement lorsque le débit décroît, ce qui a pour conséquence de réduire les temps de transfert diffusif entre les berges et de raccourcir les distances de mélange.

2.5 MISE EN PERSPECTIVE DES CONDITIONS RENCONTREES PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURE

Afin de mettre en perspective les niveaux de concentration en tritium mesurés dans l'eau de la Loire à Saumur lors de l'étude avec la mesure atypique de 310 Bq/L rapportée par l'ACRO sur le prélèvement du 21 janvier 2019, les conditions prévalant pendant l'étude de novembre 2020 à avril 2021 ont été analysées et comparées à celles de janvier 2019. Cette comparaison a porté, d'une part, sur les conditions environnementales de la Loire, en termes de débit, de température et de largeur, d'autre part, sur les rejets de tritium des CNPE du bassin versant de la Loire.

Conditions environnementales – débit, température et largeur de la Loire

La DREAL des Pays de la Loire dispose à Saumur, au niveau du pont Cessart, d'une sonde de température fournissant un relevé des températures à haute fréquence – avec environ une mesure toutes les 10 minutes. Par ailleurs, la banque HYDRO met à disposition les débits quotidiens de la Loire au niveau de la station de Saumur. L'évolution temporelle de ces grandeurs pour le mois de janvier 2019 est reproduite ci-dessous. Pour la journée du 21 janvier 2019, la température moyenne de la Loire au point de mesure (pont Cessart) s'établit à 5,5°C et le débit de la Loire à 320 m³/s.

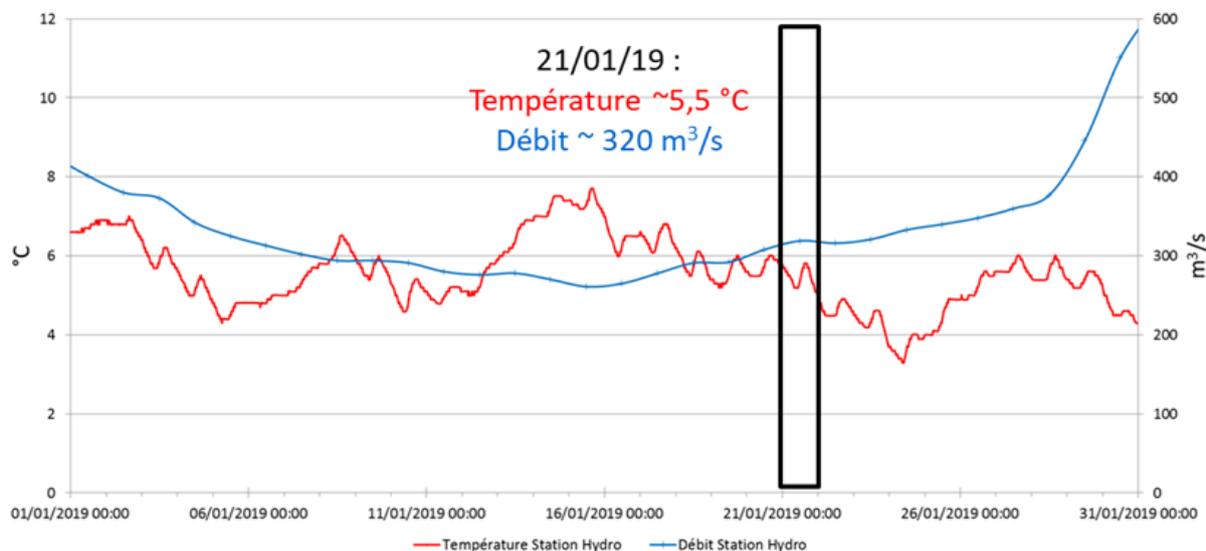


Figure 43 : Température et débit de la Loire à la station HYDRO de Saumur en janvier 2019

Pendant la campagne de mesure, chaque prélèvement manuel effectué au pont Cessart a fait l'objet d'une mesure de température, rapportée le plus souvent à 0,5°C près – parfois 0,1°C. On dispose ainsi de chroniques de température de l'eau de la Loire prélevée quotidiennement en différents points du pont : aux points C (quart droit), F (milieu) et J (quart gauche) du 9 novembre 2020 au 8 avril 2021 ainsi qu'aux points A (côté droit) et L (côté gauche) pendant les périodes d'interruption des hydrocollecteurs. Ces chroniques sont reproduites Figure 44, ainsi que la courbe du débit quotidien de la Loire à la station de Saumur, issue de la banque HYDRO.

Une large gamme de conditions de débit et de température de la Loire a été couverte lors de la campagne, du fait des conditions climatiques très variées rencontrées (automne clément, avec des débits bas et températures assez élevées, un hiver avec des débits élevés et des températures basses). L'analyse de ces conditions, entre fin novembre 2020 et début décembre 2020, permet d'identifier une période pendant laquelle les conditions de température et de débit de la Loire étaient proches de celles du 21 janvier 2019, comme illustré ci-dessous :

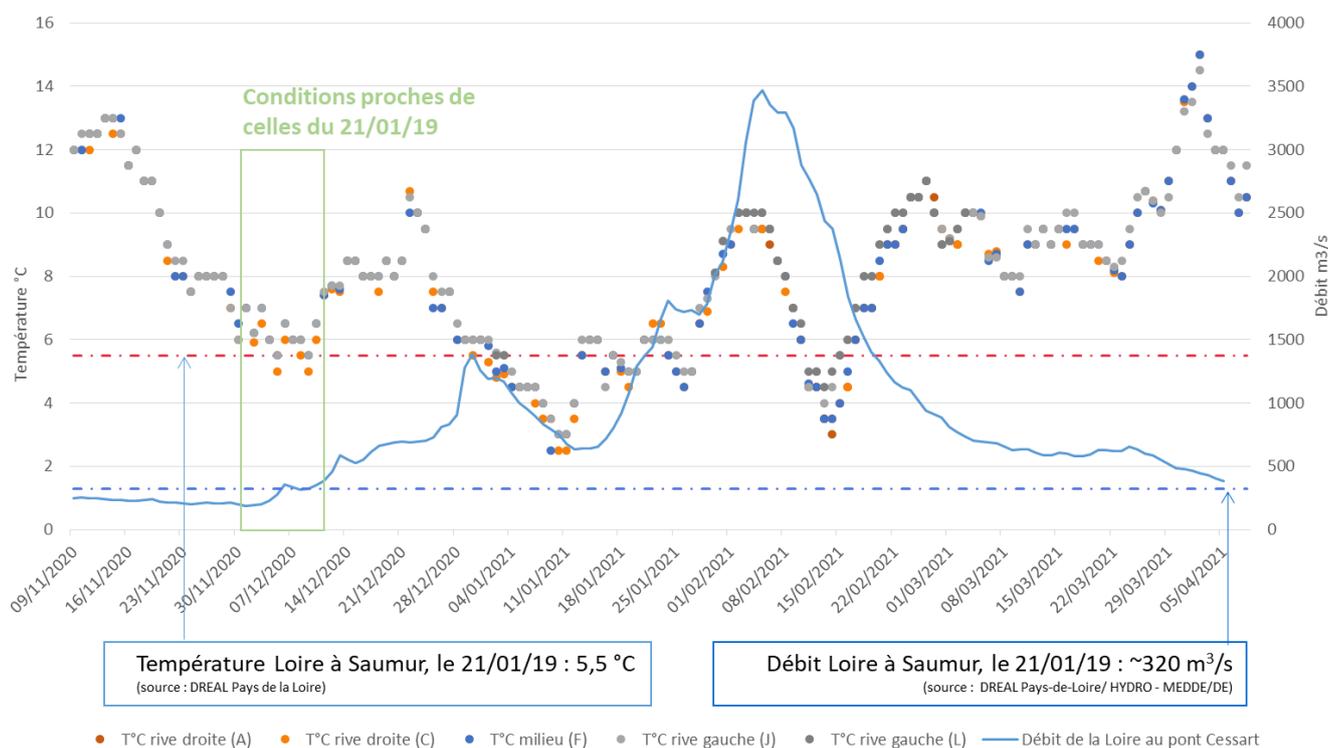


Figure 44 : Identification d'une période de la campagne où les conditions de température et de débit de la Loire sont similaires à celles du 21 janvier 2019

En complément des conditions de débit et de température de la Loire, la largeur du fleuve lors de la campagne et en janvier 2019 a été analysée. Afin d'estimer, à différentes dates d'intérêt, la largeur moyenne de la Loire entre l'amont immédiat du CNPE de Chinon et l'aval immédiat de la ville de Saumur, des images satellitaires ont été cherchées parmi celles disponibles pour les satellites Sentinel 2A et 2B de l'Agence spatiale européenne. A la date du 15/02/21, seules trois images se sont révélées exploitables pendant la campagne, compte tenu de la couverture nuageuse : celles du 14/11/20 (quand le débit de la Loire à Saumur était de 230 m³/s), du 19/11/20 (débit de 240 m³/s) et du 29/11/20 (débit de 210 m³/s). L'image exploitable la plus proche du 21/01/19 est une image du 24/01/19, quand le débit de la Loire à Saumur était de 330 m³/s.

Il a été choisi de comparer les largeurs de la Loire entre cette image du 24/01/19 (date la plus proche du 21/01/19) et celle du 29/11/20 car, parmi les 3 dates pour lesquelles on dispose d'images, c'est à cette date que le débit diffère le plus de celui du 21/01/19, et donc que la largeur est susceptible de présenter le plus de variations comparativement à celle au 21/01/19.

De façon simplifiée, le traitement d'une image pour estimer la largeur moyenne de la Loire sur une zone d'intérêt a consisté, dans un Système d'Information Géographique (SIG), à :

1. effectuer une extraction de cette zone d'intérêt dans l'image satellitaire ;
2. exploiter des bandes spectrales de l'image pour reconnaître les surfaces en eau et générer un surfacique de la Loire ;
3. découper la Loire en portions de 100 m afin de calcul de la largeur en eau de chaque portion.

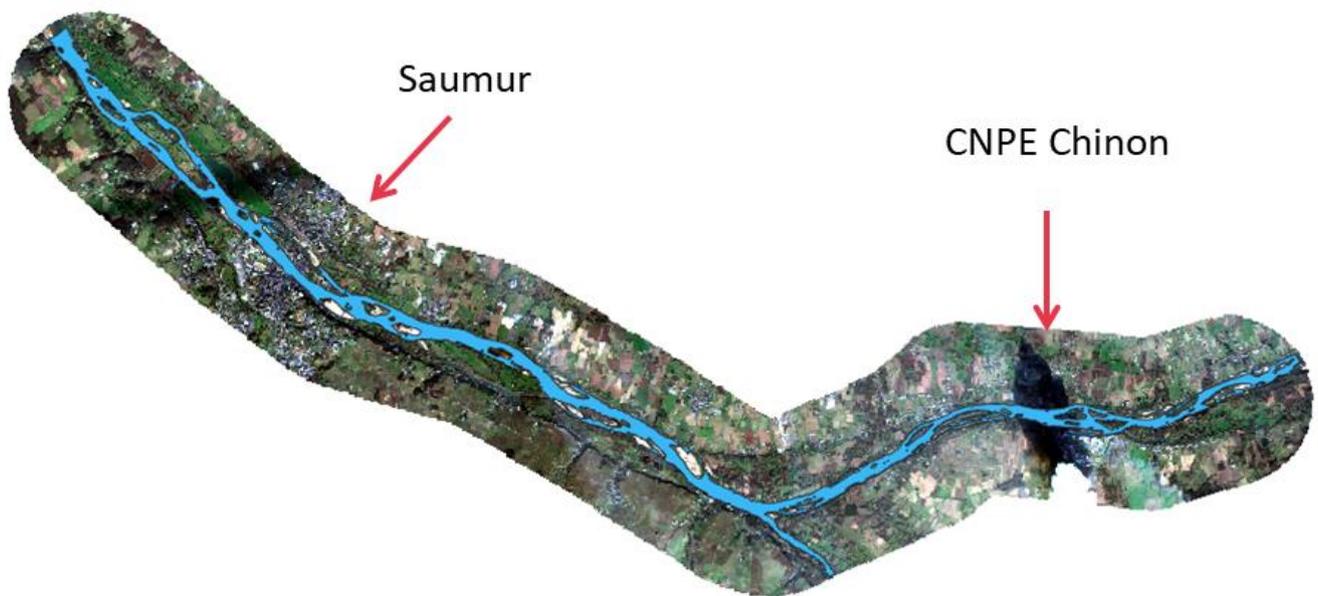


Figure 45 : Exemple du traitement sous SIG, après extraction d'une zone d'intérêt et exploitation de bandes spectrales de l'image pour identifier les surfaces en eau de la Loire et de la Vienne (en bleu).

A l'issue de ce traitement, la largeur moyenne de la Loire est calculée en faisant la moyenne arithmétique des largeurs des portions de 100 m de Loire entre le CNPE de Chinon et Saumur : elle est de 320 m pour l'image du 24/01/19 (débit de la Loire à Saumur d'environ 330 m³/s) et de 290 m pour l'image du 29/11/20 (débit de la Loire à Saumur d'environ 210 m³/s).

Les largeurs moyennes pour les dates étudiées sont proches, compte tenu des incertitudes attachées au traitement effectué (en particulier la seconde étape de reconnaissance des surfaces en eau pour chaque pixel de l'image). Il semble que la largeur moyenne évolue peu pour cette gamme de débit (hors étiage et hors crue).

Rejets déclarés des CNPE du bassin versant de la Loire

Une comparaison des rejets mensuels de chaque CNPE sur la période de janvier 2018 à avril 2021 a été menée, afin de confirmer que ceux-ci s'étaient déroulés de façon habituelle lors de la campagne. Ces rejets mensuels, tirés des registres des rejets liquides des CNPE, sont représentés dans les graphes suivants en TBq¹⁵, ainsi que les cumuls annuels dans le tableau ci-après.



Figure 46 : Rejets liquides mensuels en tritium des CNPE du bassin versant de la Loire entre janvier 2018 et avril 2021

Il ressort de cette analyse que les CNPE ont continué à rejeter normalement des effluents liquides lors de la campagne de mesure entre novembre 2020 et avril 2021.

Tableau 23 : Rejets liquides de tritium annuels par CNPE du bassin versant de la Loire (TBq/an), de 2018 à 2020

Année	Belleville	Dampierre	Saint Laurent	Chinon	Civaux	Total des 5 CNPE
2018	51	49	23	51	70	244
2019	52	50	25	51	70	248
2020	51	37	25	42	60	215

¹⁵ 1 TBq = 10¹² Bq.

Par ailleurs, une comparaison des contributions des différents CNPE à la concentration en tritium de l'eau de la Loire à Saumur est effectuée entre l'évènement du 21 janvier 2019 et la période de la campagne entre fin novembre 2020 et début décembre 2020 au cours de laquelle les conditions environnementales étaient les plus proches en termes de débit et température de Loire de celle de janvier 2019. Cette comparaison fait appel aux résultats de la modélisation 1D menée avec SYMBIOSE et présentés plus loin dans ce rapport.

Lors de l'épisode du 21 janvier 2019, les simulations indiquent une contribution des CNPE de Chinon et de Belleville et, dans une moindre mesure de celui de Civaux. Sur la période entre fin novembre et début décembre 2020, les cinq CNPE du bassin versant apportent tour à tour leur contribution, atteignant des niveaux proches de ceux du 21 janvier 2019 (en particulier pour Belleville, Civaux et dans une moindre mesure Chinon).

21/01/19 : Mesure 310 Bq/L

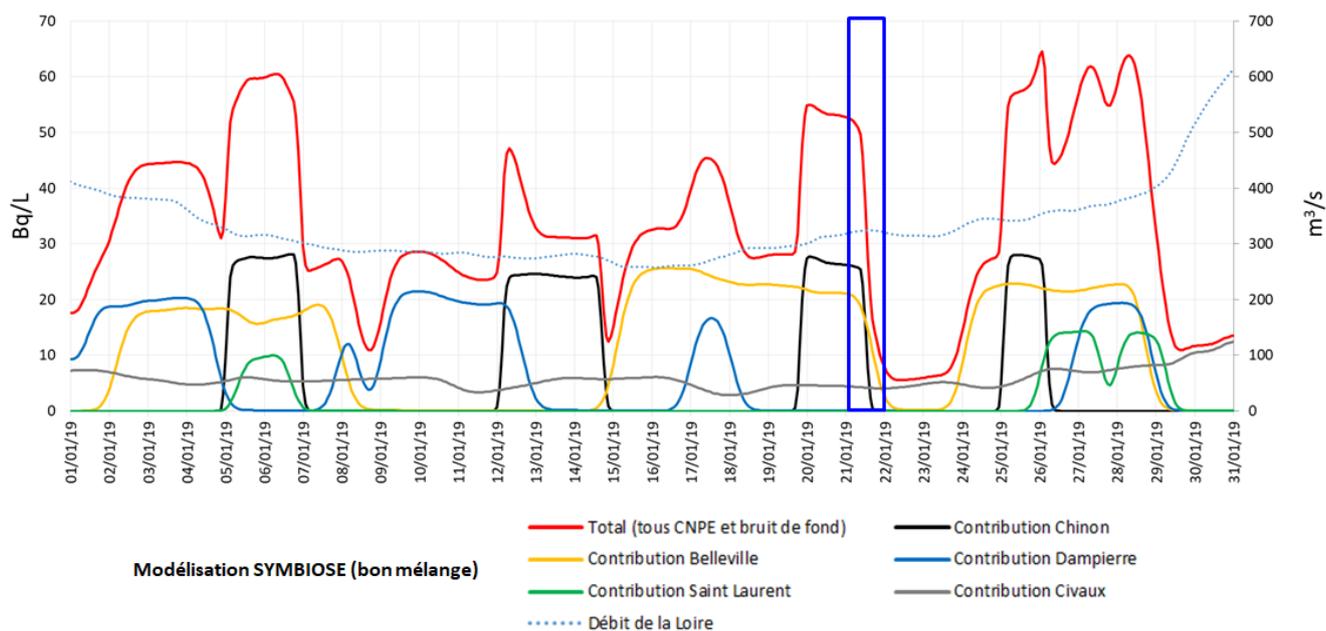


Figure 47 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE), en supposant que Loire et Vienne sont mélangées, en janvier 2019

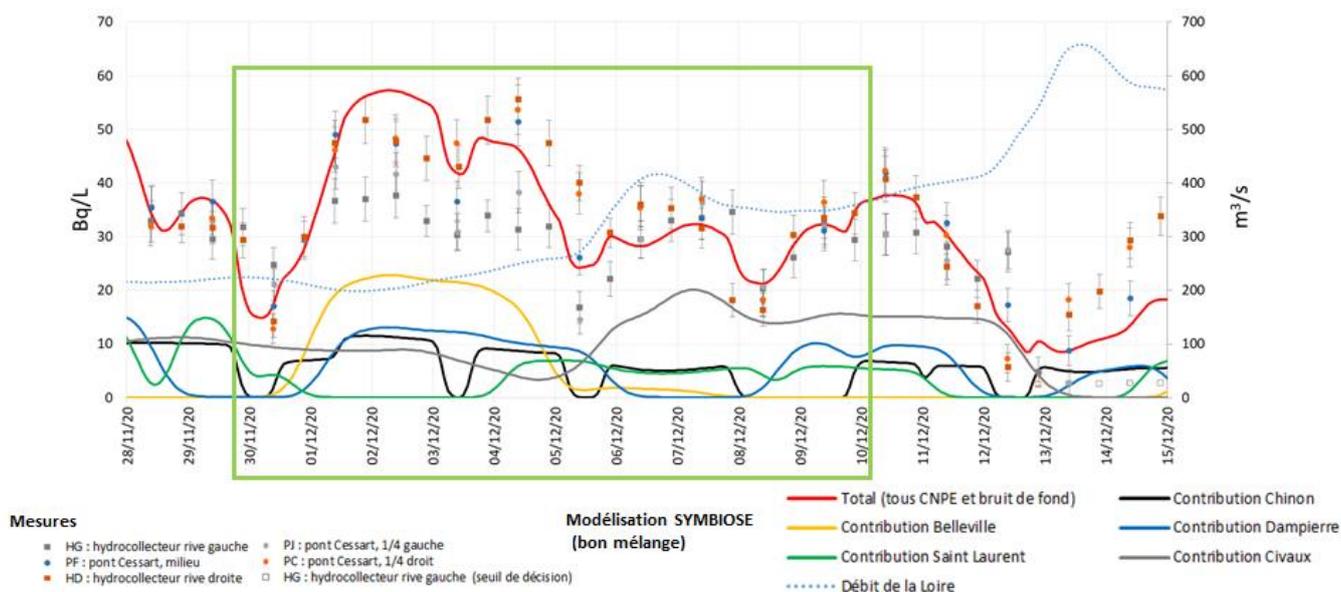


Figure 48 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE), en supposant que Loire et Vienne sont mélangées, entre fin novembre 2020 et mi-décembre 2020

Bilan de la mise en perspective des conditions rencontrées pendant la campagne de mesures

Il ressort de cette analyse que pendant la campagne de mesure, de novembre 2020 à avril 2021 :

- les CNPE ont continué à rejeter du tritium dans leurs effluents liquides dans des gammes d'activités comparables à celles des années précédentes ;
- les conditions climatiques rencontrées ont été très variées (automne clément, avec de bas débits et des températures assez élevées, un hiver avec des débits élevés et des températures basses) et ont couvert une large gamme de conditions de débit et de température de la Loire.

Durant la campagne de mesure, sur la période entre fin novembre 2020 et début décembre 2020 :

- les conditions étaient proches de celles du 21 janvier 2019 en termes de débit, température et de largeur de la Loire ;
- les niveaux de concentration en tritium à Saumur induits par les rejets des CNPE du bassin versant étaient proches de ceux du 21 janvier 2019.

LE COMITE DE SUIVI

3.1 MEMBRES, OBJECTIFS ET FONCTIONNEMENT

Création du Comité de suivi

Le lundi 19 octobre 2020, l'IRSN et l'ASN ont présenté conjointement les objectifs et la méthodologie de l'étude devant des représentants des parties prenantes suivantes : Ville de Saumur, Cli de Chinon, ACRO, Réseau de préleveurs citoyens et EDF.

Lors de cette réunion, le souhait a été formulé que soit mis en place un Comité de suivi de l'étude, ce qui a été réalisé.

Membres du Comité de suivi de l'étude

Le Comité de suivi était constitué à l'origine de membres de l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'ouest (ACRO), de l'Association nationale des commissions locales d'information (ANCCLI), de la Commission locale d'information (Cli) de Chinon, de la Mairie de Saumur, de la Direction départementale des territoires de Maine-et-Loire (DDT-49), de l'ASN-DEU, de l'ASN-Division d'Orléans, d'EDF et de l'IRSN, sachant qu'il avait été annoncé que ce Comité de suivi restait ouvert à d'autres parties prenantes qui souhaiteraient le rejoindre.

La participation pluraliste s'est enrichie au fur et à mesure des réunions. C'est ainsi que le Réseau Loire Alerte, syndicat regroupant les collectivités productrices d'eau potable de Loire, Maine et Loire et Loire Atlantique, a rejoint le Comité à l'occasion de la deuxième réunion du Comité de suivi du 18 janvier 2021.

De plus, un membre de la Cli de Civaux a rejoint le Comité en février 2021. Un échange spécifique a été organisé entre ce membre et des experts de l'IRSN en février 2021 afin de faire un point sur l'état d'avancement et les résultats de l'étude et de répondre à ses interrogations.

La liste complète des membres du Comité de suivi de l'étude se trouve dans l'annexe 10.7 de ce document.

Objectifs et fonctionnement du Comité de suivi de l'étude

La pérennisation du Comité de suivi, ses objectifs et son mode de fonctionnement ont été validés lors de la 1^{ère} réunion du Comité de suivi du 2 décembre 2020.

Les objectifs du Comité de suivi ont été les suivants :

- partager régulièrement les informations sur le déroulement de l'étude ;
- présenter les résultats des mesures et des modélisations au fur et à mesure de leur acquisition ;
- échanger en continu et de manière collaborative sur l'analyse de ces données.

Le mode de fonctionnement proposé et retenu a été le suivant :

- réunions du Comité de suivi toutes les six semaines. Cette fréquence prend en compte le délai de réception et d'exploitation par l'IRSN des registres de rejets d'EDF via l'ASN, données indispensables pour modéliser les concentrations en tritium issues des rejets et les comparer aux mesures ;
- échanges permanents entre les différentes parties prenantes tout au long de l'étude, notamment sur les retours d'expérience des visites de terrain ;
- présentations des différents participants aux réunions de ce Comité, s'ils le souhaitent ;
- élaboration d'un compte rendu à l'issue de chaque réunion du Comité de suivi, validé par l'ensemble des parties prenantes ;
- mise en ligne des supports de présentation aux réunions du Comité de suivi, ainsi que des comptes-rendus des réunions du Comité sur le site internet de l'IRSN à l'adresse internet suivante : www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-locales/Etude-TritiumLoire/Pages/Etude-tritium-Loire-Pont-Cessart-Saumur.aspx ;
- le rapport final de l'étude présentant les résultats des mesures, des modélisations ainsi que les enseignements à en tirer, élaboré par l'IRSN, est rendu public via son site internet. Au préalable, il a été partagé avec les parties

prenantes du Comité, qui ont été invitées, si elles le souhaitaient, à faire part de leur remarques et commentaires dans une annexe dédiée du rapport.

Au total, le Comité s'est réuni à quatre reprises : 2 décembre 2020, 18 janvier 2021, 22 mars 2021 et 28 juin 2021. Ces réunions ont été organisées via Teams, compte-tenu du contexte sanitaire. Le Comité de suivi a été consulté sur la durée de l'étude qui, initialement prévue pour durer 4 mois, a été prolongée d'un mois supplémentaire pour prendre en compte la période de crue de la Loire de fin janvier 2021. Au cours de cette dernière réunion de juin 2021 qui s'est tenue en distanciel et pour partie en présentiel à Saumur, tous les résultats de l'étude ont été présentés ainsi que les conclusions et recommandations de l'IRSN.

A la suite d'une demande de la Cli de Chinon et indépendamment du Comité de suivi (même si certaines personnes appartenaient aux deux instances), l'IRSN a présenté l'étude à l'ensemble des membres de la Cli lors de la réunion plénière du 10 décembre 2020. De plus, l'IRSN s'est engagé à présenter l'ensemble des résultats obtenus ainsi que les conclusions de cette étude lors d'une future réunion plénière de la Cli de Chinon (dont l'invitation ne nous est pas encore parvenue à la date de rédaction de ce rapport).

— Visite des dispositifs au pont Cessart

L'IRSN a organisé une visite des dispositifs de prélèvement d'eau de la Loire au niveau du pont Cessart à Saumur le 16 décembre 2020. L'ensemble des membres du Comité de suivi ainsi que les membres de la Cli de Chinon ont été conviés à cette présentation in situ des moyens mis en œuvre. De plus, cette visite était ouverte à tout public intéressé dans le respect des mesures sanitaires en vigueur.

Elle a rassemblé des participants de divers horizons et plus particulièrement Messieurs le sous-préfet de Saumur, le Président de la Cli de Chinon, le chargé de mission de la Cli de Chinon, le Maire de Bagneux et représentant de la communauté d'agglomération Saumur Val-de-Loire à la Cli de Chinon ainsi qu'un membre de la Cli de Chinon au titre de FNE, le responsable environnement au CNPE de Chinon, des membres de la Cli représentant d'associations de pêcheurs et de journalistes de la presse locale. Les intervenants du laboratoire Inovalys ont présenté les procédures de prélèvements et d'aliquotage et l'IRSN a présenté les hydrocollecteurs et leur fonctionnement et répondu aux questions sur l'étude.

3.2 ETUDES TECHNIQUES PRESENTÉES PAR DES MEMBRES DU COMITE

Les réunions de Comité de suivi ont été également l'occasion pour ses membres de présenter les résultats d'études techniques réalisées en propre, indépendamment de celle menée par l'IRSN, d'échanger sur ces présentations et, le cas échéant, sur les questionnements qu'ils faisaient émerger.

— Etude thermographique par la Cli de Chinon

Présentation

Lors de la réunion du 18 janvier 2021, le président de la Cli de Chinon a présenté les résultats des mesures thermographiques réalisées par un des membres, à partir du pont aval le plus proche de la clarinette de rejet du CNPE de Chinon, le 10 décembre 2020 à 13h30 (date de la réunion plénière de la Cli de Chinon).

Les première et deuxième prises de vue ont été réalisées depuis le pont "Port Boulet" en direction de l'amont, c'est-à-dire face à la clarinette de rejet du CNPE de Chinon. Quant à la troisième mesure thermographique (présentée à gauche sur la Figure 49), elle a été faite depuis le parapet côté aval du pont (de "Port Boulet") en regardant vers l'aval, entre la 5^{ème} et la 6^{ème} pile (à partir de la rive gauche). Le matériel utilisé était une caméra FLIR E4 disponible dans le commerce.

À la suite de cette présentation, des échanges et des questionnements ont eu lieu sur les rejets par les 11 buses de la clarinette, notamment l'effet de leur dysfonctionnement sur la dispersion des rejets rapportés dans les comptes-rendus des Comités de suivi disponibles sur internet et rappelés ci-après. Ces questionnements ont également conduit l'IRSN à modéliser l'influence du fonctionnement de la clarinette de rejet sur les concentrations en tritium attendues en aval proche et plus éloigné (pont Cessart) du point de rejet du CNPE (cf. chapitre 5.3).

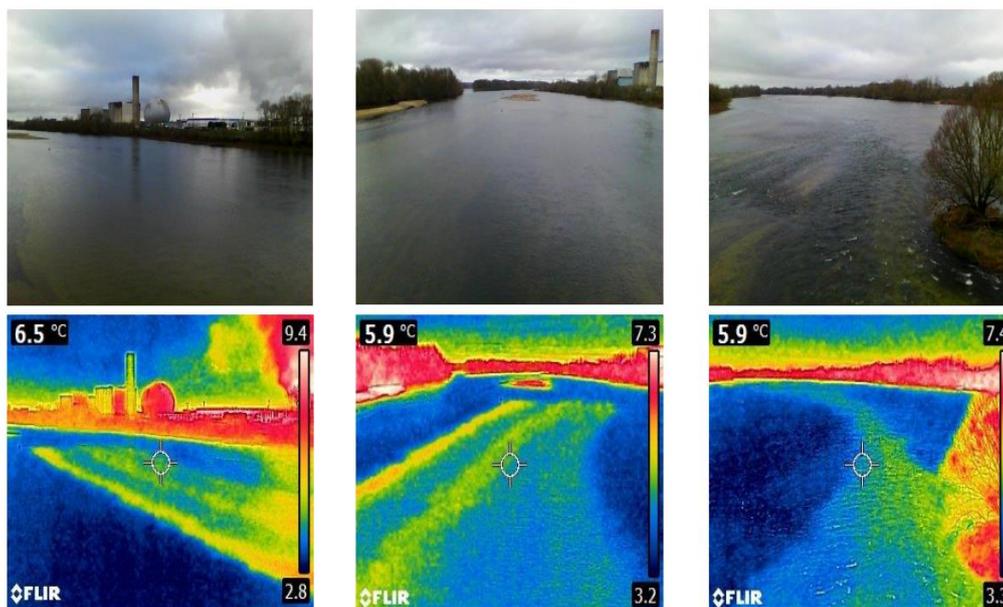


Figure 49 : Relevés thermographiques de la Cli de Chinon

Discussions du 18 janvier 2021 relatives à la clarinette

Un membre de la Cli de Chinon fait l'hypothèse que les mélanges ne se font pas à la sortie de la clarinette et, que les trous de la clarinette ne rejettent pas de la même manière. Un membre de la Cli de Chinon demande aux représentants d'EDF s'ils réalisent ce type de relevés thermographiques. EDF répond qu'ils réalisent des relevés de températures in situ et que la question de l'homogénéisation thermique est relativement compliquée du fait des nombreux facteurs influençant les températures d'eau en Loire, comme par exemple la présence d'herbiers ou de bancs de sable.

À la suite d'une demande du Comité, EDF précise que la clarinette sert non seulement pour les rejets radioactifs des réservoirs d'effluents après contrôles, mais également en permanence pour les rejets des eaux de refroidissement. Les rejets des réservoirs d'effluents se font à des débits d'environ 5 m³ /h alors que les rejets des eaux de refroidissement se font à des débits de 4 à 5 m³/s.

Un membre de l'ACRO demande si des mesures ont été faites à la sortie de la clarinette au moment des rejets. EDF répond que non. Le Comité rappelle que l'on peut s'attendre à des concentrations de l'ordre de 500 Bq/L en tritium en sortie de clarinette comme cela a été discuté lors de la réunion d'enclenchement de l'étude. Un membre de l'IRSN rappelle que l'étude préliminaire qui avait été présentée lors de la première réunion du Comité de suivi avait mis en exergue une mesure ponctuelle à 80 Bq/L au niveau de la rive gauche du pont le plus proche en aval de la clarinette, soit 400 mètres, mais sans connaissance précise de la localisation du passage des rejets dans le lit du fleuve.

Un membre de la Cli souligne que les photos (mesures thermographiques) présentées en réunion (Figure 49) donnent l'impression d'une hétérogénéité de la diffusion des rejets sur la largeur de la clarinette. Sur ces relevés, on observe uniquement 3 sources de rejets : faible pour le rejet le plus proche de la rive, forte à l'extrémité de la clarinette, et moyenne entre les deux précitées. Il indique que ces mesures thermographiques donnent l'impression que des trous de la clarinette semblent bouchés et demande à EDF combien elle possède de trous, de quelle distance ils sont espacés et s'ils sont inspectés régulièrement.

Un représentant EDF indique que la clarinette fait environ 50 mètres de long et qu'elle possède 11 orifices. Les orifices sont donc espacés d'environ 5 mètres. Les orifices sont de taille identique et font l'objet d'inspections télévisuelles périodiques. La dernière inspection de la clarinette par EDF, réalisée durant l'été 2020, a conclu que les 11 orifices étaient opérationnels. Le membre de la Cli indique qu'un examen de la clarinette au mois d'août 2020 a donc été réalisé 5 mois avant les mesures thermographiques. Selon lui, la présence d'herbes (sans doute de sable du fond du lit du fleuve) fait peser un doute sur la répartition des rejets sur la longueur de la clarinette (11 trous déclarés, et 3 rejets visibles...), sans oublier que le lit de la Loire

est en perpétuel mouvement, mis en évidence par les variations des implantations des bancs de sables et des îles tout au long de son cours.

— Campagnes d'étude de dilution d'EDF

EDF a présenté devant le Comité de suivi les résultats de campagnes d'études de dilution des rejets radioactifs liquides en aval du CNPE de Chinon (voir les présentations complètes en annexe des comptes rendus des réunions du Comité de suivi du 22 mars et du 28 juin 2021).

Deux traceurs ont été utilisés pour ces études de dilution : le tritium pour le suivi du panache radioactif et la température pour le suivi du panache thermique.

Campagne de mesures du tritium par EDF

Trois campagnes de mesures par suivi du tritium, issu du rejet dans la Loire de réservoirs KER du CNPE de Chinon, ont été réalisées par EDF en aval de Chinon, le 25 octobre 2017, le 27 mars 2019 et le 24 juin 2020 présentant des débits de la Loire différents (respectivement 95, 377 et 346 m³/s). Les précisions opérationnelles des campagnes ainsi que les conclusions détaillées sont mentionnées dans le compte rendu de la réunion N°3 du Comité de suivi du 22 mars 2021.

Le bilan des campagnes de mesure EDF est présenté ci-après.

BILAN DES CAMPAGNES DE MESURE

Ces campagnes permettent d'affiner la connaissance de la dilution des rejets d'effluents en Loire du CNPE de Chinon :

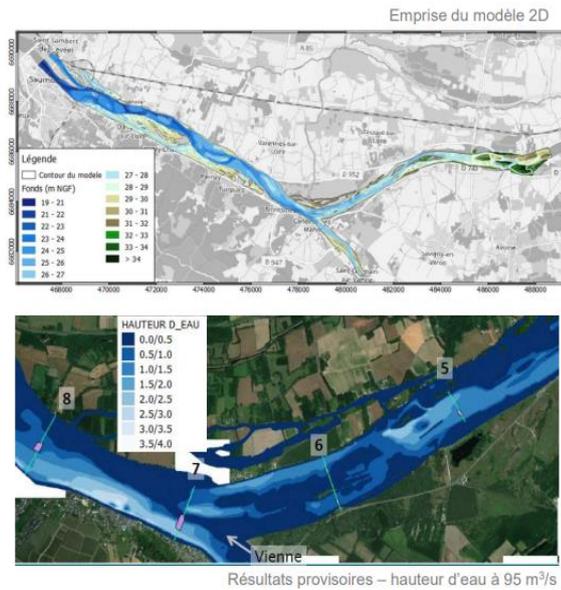
- La veine de rejet est généralement positionnée au centre gauche du fleuve, dans le prolongement de l'ouvrage de rejet
- La morphologie de la Loire a une influence importante sur le mélange : les nombreuses îles et bancs de sables entraînent une variabilité naturelle des conditions de mélange en Loire
- La confluence avec la Vienne modifie la dilution : le mélange des 2 cours d'eau génère une nouvelle zone d'hétérogénéité des masses d'eau
- La dilution varie suivant le débit de la Loire, avec une diminution plus rapide des activités maximales en Loire pour les débits les plus faibles
- La dilution complète n'a pas été observée à Montsoreau ou au pont Cessart à Saumur, ce qui est cohérent avec les mesures de l'IRSN



Figure 50 : Bilan des campagnes de mesure du tritium dans la Loire par EDF

PERSPECTIVES : SUITE DE L'ÉTUDE DE DILUTION

- **Construction et validation d'un modèle numérique 2D de dilution :**
 - Calage hydrodynamique (hauteur d'eau et vitesse)
 - Calage et validation de la dilution sur les campagnes de mesures tritium disponibles
 - Simulations pour différents scénarios de débits en Loire
- ↓
- **Modèle numérique couvrant :**
 - la Loire au droit du CNPE
 - la confluence avec la Vienne
 - la Loire jusqu'à l'aval de Saumur
 - Réalisation de tests de sensibilité à la bathymétrie et aux débits de la Loire et de la Vienne



Travail en cours sur 2021

Figure 51 : Perspectives d'actions d'EDF pour donner suite à son étude de dilution du tritium dans la Loire



RÉSULTATS AU DROIT DE LA SMP AVAL

6,5 km en aval du point de rejet

- Tritium retrouvé dans les 2 bras séparés par une île
- Activité plus importante dans le bras droit
- Le positionnement de la SMP aval est satisfaisant à faible débit et en limite de veine de rejet pour les débits plus élevés

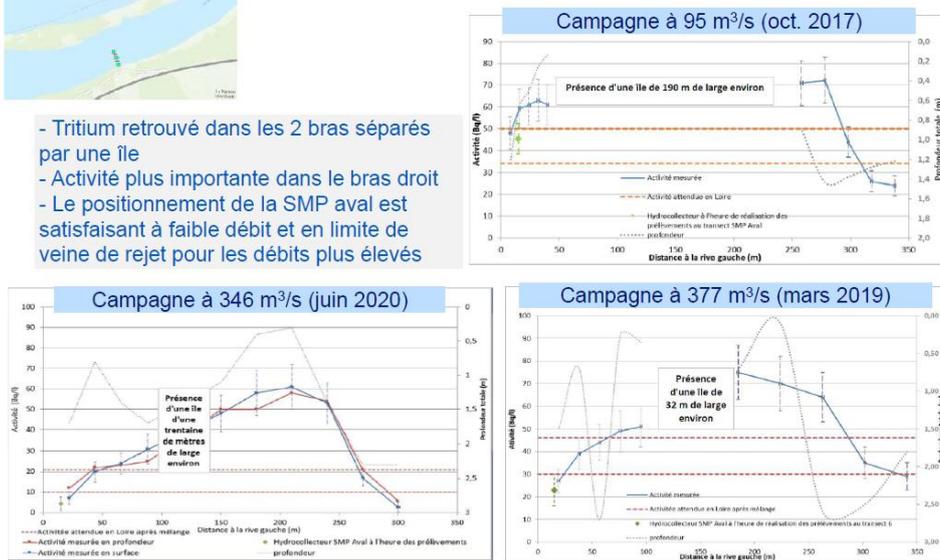


Figure 52 : Résultats des campagnes de mesure d'EDF à la SMP aval

On peut notamment retenir des présentations d'EDF que :

- « la dilution complète n'a pas été observée par EDF à Montsoreau ou au pont Cessart à Saumur, ce qui est cohérent avec les mesures de l'IRSN » ;

- « le positionnement de la SMP aval est satisfaisant à faible débit¹⁶ et en limite de veine de rejet pour les débits plus élevés » ;

Dans la continuité des travaux présentés, EDF a indiqué travailler actuellement à la construction et à la validation d'un modèle numérique 2D de dispersion. Ce modèle couvrira la Loire entre le CNPE de Chinon et l'aval de Saumur en intégrant la confluence de la Vienne. Il s'agira dans ce cadre de réaliser des tests de sensibilité à la bathymétrie et aux débits de la Loire et de la Vienne. EDF indique que ce travail sera réalisé en 2021.

Etudes par suivis thermique et thermographique des rejets réalisées par EDF

Lors de la 4^{ème} réunion du Comité de suivi du 28 juin 2021, EDF a présenté les résultats de campagnes par thermographies aériennes et suivis thermiques sur la Loire réalisées en aval des rejets de Chinon en mars 2021. Les principaux éléments présentés par EDF sont présentés ci-après.

2. Principe des campagnes par suivi thermique

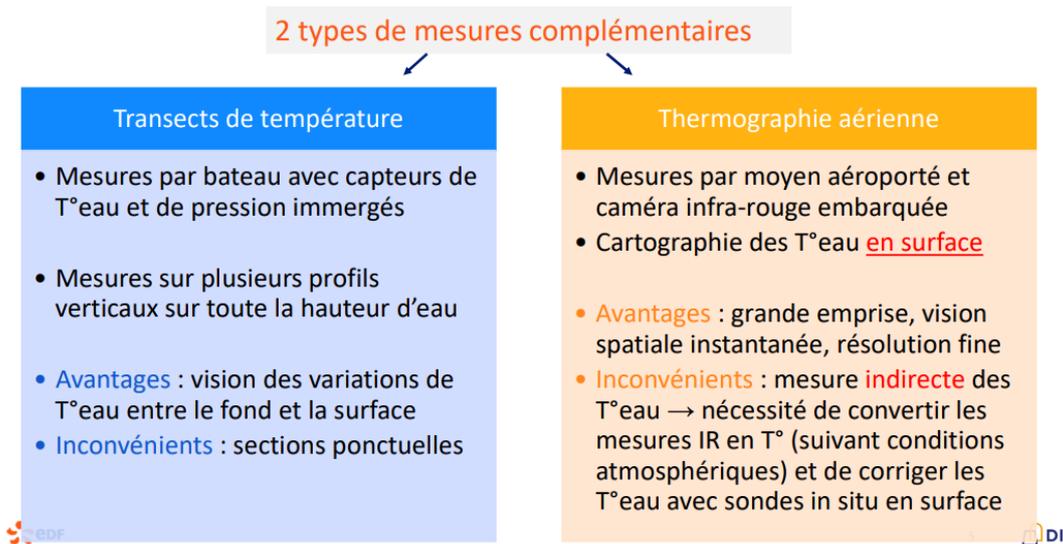


Figure 53 : Campagnes de suivi thermique des eaux de la Loire par EDF

¹⁶ Campagne à 95 m³/s d'octobre 2017.

3. Thermographie réalisée au dessus des rejets de Chinon le 31 mars 2021 (de 13h à 14h)

Matériel : caméra thermique haute résolution FLIR – 5 sondes en Loire (en surface)
 Altitude de vol : 2 vols réalisés à 1550 m et 550 m d'altitude (zoom sur les rejets)
 Résolution : de 2 m par pixel à 0,8 m par pixel



Figure 54 : Mesures thermographiques EDF des rejets du CNPE de Chinon

4. Résultats – vol à 1550 m (2 m/pixel)

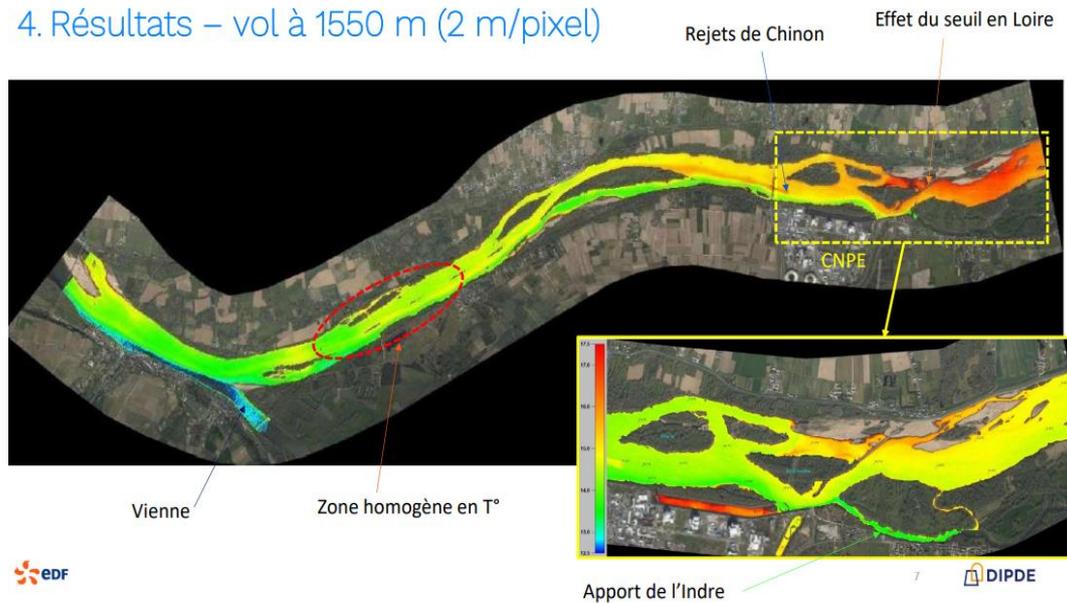


Figure 55 : Visualisation thermographique des rejets du CNPE de Chinon et des apports de l'Indre

4. Zoom sur les rejets

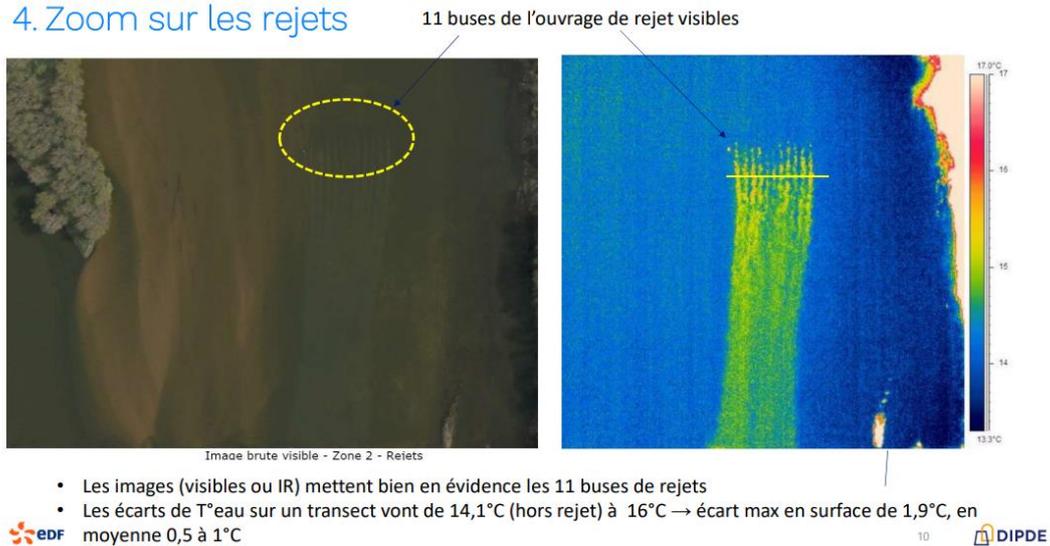


Figure 56 : Visualisation thermographique des rejets du CNPE de Chinon par les 11 buses

3. Transects de température réalisés le 9 mars 2021

Matériel : embarcation légère type zodiac et sonde T° autonome OTT (précision 0,3°C)

Nombre de transect : 5 transects dont 4 en aval des buses de rejet, réalisés de 9h à 15h

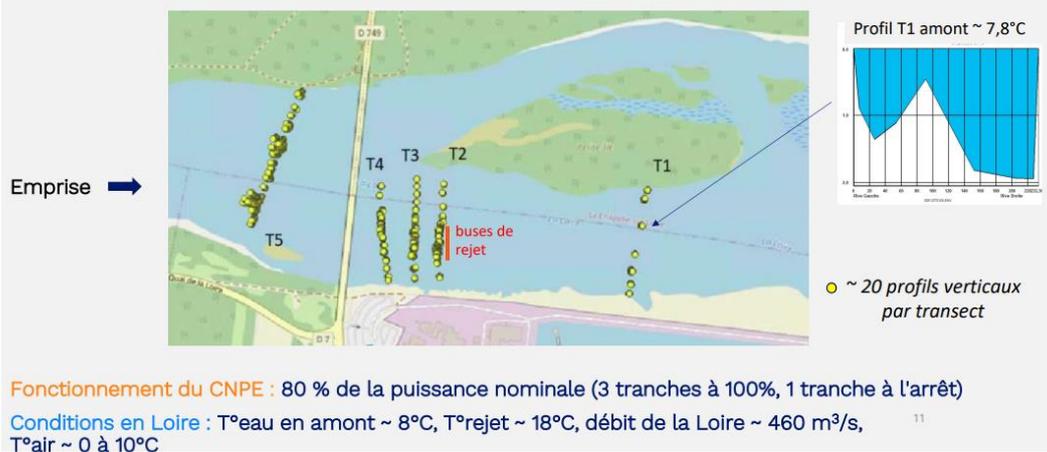


Figure 57 : Transect de température en amont et en aval du pont Cessart à Saumur par EDF

4. Transects de T°eau mesurés le 3 mars 2021

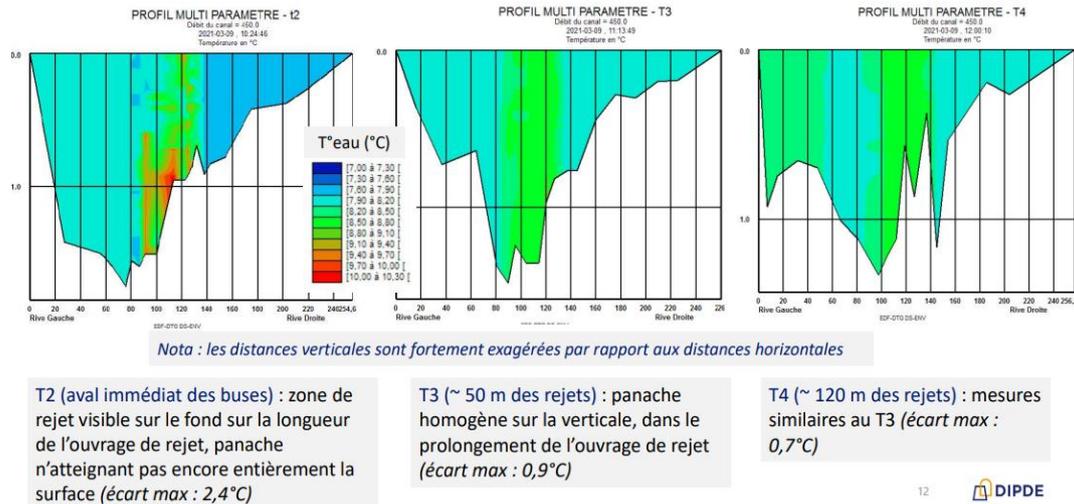


Figure 58 : Transect des températures des eaux de la Loire au pont Cessart à Saumur par EDF

4. Bilan des suivis thermiques réalisés en mars 2021

Thermographie :

- L'influence de l'Indre et de la Vienne est bien visible et localisée en rive gauche de la Loire avec des T°eau plus fraîches de 0,7°C à 1°C
- À l'aval immédiat des buses de rejets, le panache d'eau échauffée dans la Loire est visible avec 11 buses bien identifiées en surface
- L'élévation de T° mesurée est d'environ +1°C à +1,8°C en surface en aval immédiat des buses. La largeur du panache en surface est ~ 50 m jusqu'à ~ 115 m, en arrivant sur la Grande île de Chouzé
- L'échauffement mesuré en surface issu des rejets se stabilise à environ +0,4°C au niveau de la Grande île de Chouzé
- Le panache contourne l'île par le bras droit et est encore visible jusqu'à environ 5,6 km en aval des rejets.
- Au delà de 6 km, la masse d'eau échauffée n'est plus visible et la T°eau est considérée homogène.

Nota : la limite réglementaire porte sur l'échauffement calculé après mélange, avec une valeur maximale de 1°C

Transects de T°eau :

- Confirme la longueur de rejet sur le fond de la Loire (en aval immédiat des buses)
 - Montre l'homogénéisation très rapide sur la toute la hauteur d'eau (dès 50m environ) => absence de stratification verticale
-

13

Figure 59 : Bilan des suivis thermiques EDF

Les principaux enseignements tirés par EDF de ces études sont les suivants :

- les rejets par les onze buses sont clairement visibles ;
- « au-delà de 6 km, la masse d'eau échauffée n'est plus visible et la température de l'eau est considérée homogène » ;
- dès 50 m du point de rejet, la stratification verticale de la température n'est plus visible.

3.3 POINT SUR LES EAUX DE BOISSON

Les membres du Comité de suivi ont abordé à plusieurs reprises le sujet des concentrations en tritium dans les eaux de boisson distribuées à Saumur. L'ASN/DEU a indiqué que le but de cette étude était de mieux connaître les concentrations en tritium dans l'environnement à savoir les eaux de la Loire et que l'eau potable relevait de la compétence de la Direction générale de la santé (DGS). L'IRSN a rappelé que l'objectif de la présente étude était d'apporter des explications à la mesure atypique de 310 Bq/L réalisée dans la Loire au pont Cessart.

L'IRSN a rappelé la stratégie de contrôle radiologique des eaux de consommation humaine inscrite dans la circulaire de la DGS (circulaire DGS/EA4 n°2007-232 du 3 juin 2007) et notamment la référence de qualité de 100 Bq/L en tritium ainsi que les valeurs guides de 0,1 Bq/L pour l'indice alpha global et de 1 Bq/L pour l'indice bêta global résiduel, déclenchant en cas de dépassement, des analyses complémentaires afin de mesurer les activités en radionucléides naturels et/ou artificiels présents dans l'eau dans le but d'estimer la dose indicative (annuelle) induite par la consommation annuelle d'une telle eau à raison de 2 litres d'eau par jour. La circulaire précise, qu'en cas de dépassement des références de qualité de 100 Bq/L pour le tritium ou de 0,1 mSv/an pour la dose indicative, des actions peuvent être entreprises pour en rechercher l'origine et des actions correctives mises en œuvre afin de réduire ces expositions.

A la réunion du Comité de suivi du 28 juin 2021, un représentant de l'ARS Pays de la Loire était présent. En réponse à la question d'un membre du Comité de suivi qui regrettait qu'il n'y ait pas dans les conclusions de cette étude de recommandation en lien avec les exploitants d'eau potable, le représentant de l'ARS Pays de la Loire a indiqué que le contrôle sanitaire des eaux se faisait avec l'accord des stations de traitement des eaux en aval des CNPE. Il a indiqué que lorsque le contrôle ne permettait pas de faire un suivi par des mesures fréquentes (en raison du coût important pour le consommateur), le contrôle était réalisé de manière statistique. Il a précisé que le problème du tritium dans la Loire est bien pris en compte par l'ARS et le Réseau Loire Alerte, et que l'ARS était disposée à mieux caler le suivi sur les rejets des centrales et à faire évoluer les contrôles dans ce domaine.

RESULTATS DE L'ETUDE

4.1 CAMPAGNE DE MESURES AU PONT CESSART DE NOVEMBRE 2020 A AVRIL 2021

Mesure des concentrations en tritium dans la Loire et exploitation des résultats

Transect de la Loire au pont Cessart les 5 et 6 novembre 2020

Quelques jours avant le début de l'étude, un transect de 12 points de prélèvement, positionnés entre chaque pile du pont, a été réalisé début novembre 2020 afin de disposer de mesures plus précises suivant le transect du pont et de confirmer la pertinence de retenir 3 points de prélèvements manuels pour l'étude.

Douze échantillons ont été prélevés quasi simultanément par trois fois entre le 5 et le 6 novembre 2020, depuis le pont, comme présenté ci-dessous.



Figure 60 : Points de prélèvement les 5 et 6 novembre 2020

Comme cela avait été évoqué lors de l'étude préliminaire de septembre 2020, trois gammes de concentrations en tritium semblent se distinguer sur la largeur du pont, au premier quart, au centre et au quatrième quart du pont. Les points C au premier quart rive droite, F au milieu et J au dernier quart rive gauche, représentatifs respectivement de ces trois zones ont donc été retenus pour l'étude en plus des deux points situés sur chaque rive (hydrocollecteurs).

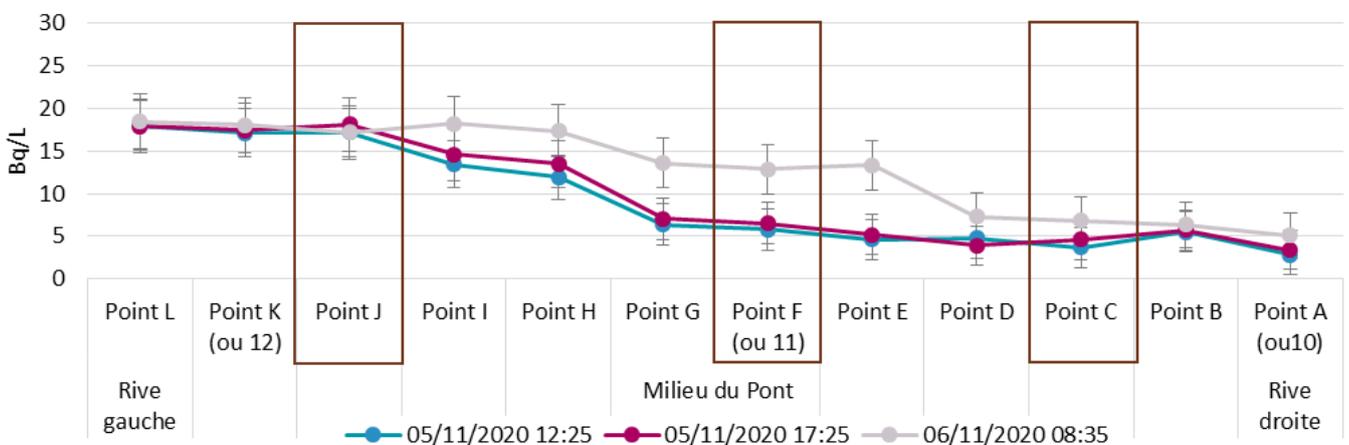


Figure 61 : Concentrations en tritium de l'eau prélevée en 12 points du pont Cessart les 5 et 6 novembre 2020

Rappel sur les conditions de débits de la Loire pendant la campagne de mesure

La campagne de prélèvement a connu une succession de régimes hydrauliques de la Loire au pont Cessart, avec des variations de débits proches d'un facteur 20, de 188 m³/s à 3470 m³/s.

L'essentiel des mesures de débit se trouve en dessous de 700 m³/s, avec pour le premier et le dernier mois de l'étude des valeurs comprises entre 200 et 500 m³/s. La moyenne constatée sur la période, proche de 1000 m³/s, est quant à elle largement influencée par l'épisode de crue de fin janvier 2021.

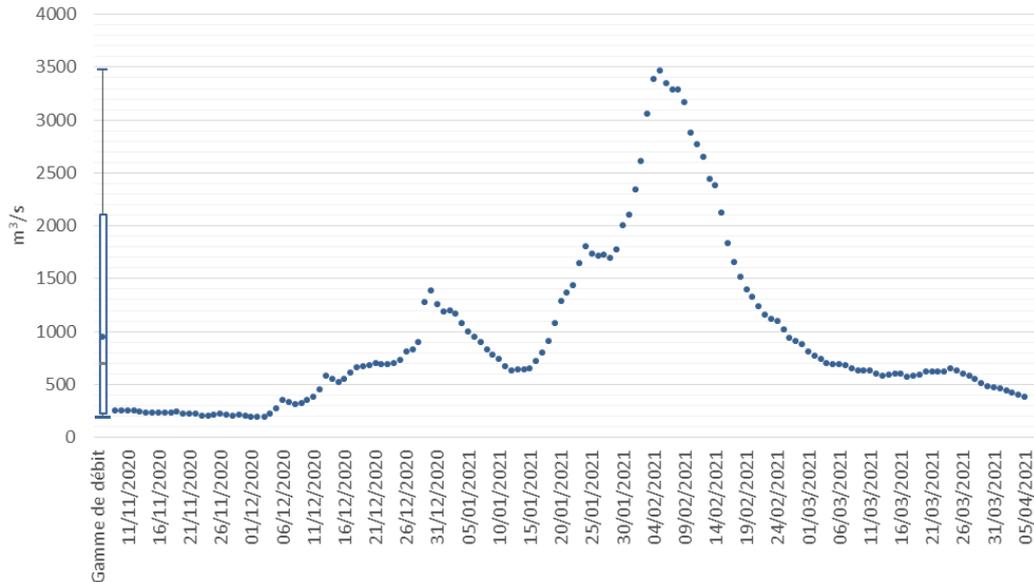


Figure 62 : Débit de la Loire au pont Cessart au cours de l'étude

Résultats de la campagne de mesures

L'ensemble des résultats acquis au cours de cette campagne présentés ci-après compte près de 1000 valeurs¹⁷ (voir annexe 10.6). Dans les graphiques suivants, ces données sont mises en perspective avec les débits de la « Loire seule »¹⁸, de la « Vienne seule »¹⁹ ainsi que de la Loire totale au pont Cessart.

¹⁷ L'intégralité des données a été mise à disposition sur le site de RNM (www.mesure-radioactivite.fr) ainsi que sur le site de l'IRSN (www.irsn.fr)

¹⁸ Extrapolation du débit de la Loire sans la Vienne au pont Cessart.

¹⁹ Ce débit est le débit calculé par Symbiose au niveau du pont Cessart, dû aux débits calculés en Vienne (dans la phase de calcul hydraulique décrit par ailleurs dans le §2.4.1). Il tient donc compte du temps de transfert entre la confluence et Saumur (et ne correspond donc pas exactement au débit de la Vienne avant la confluence à un instant précis).

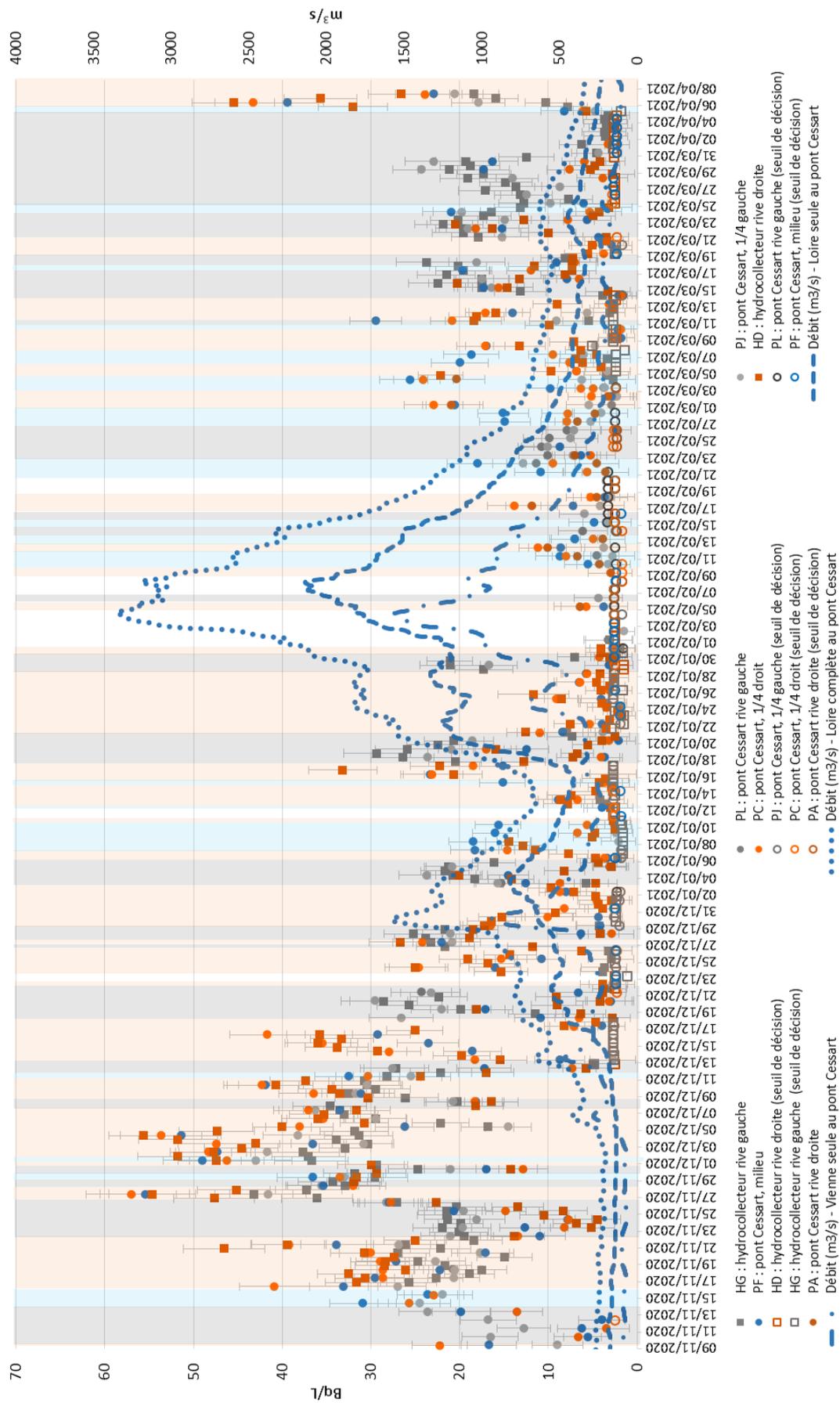


Figure 63 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 9 novembre 2020 et le 8 avril 2021

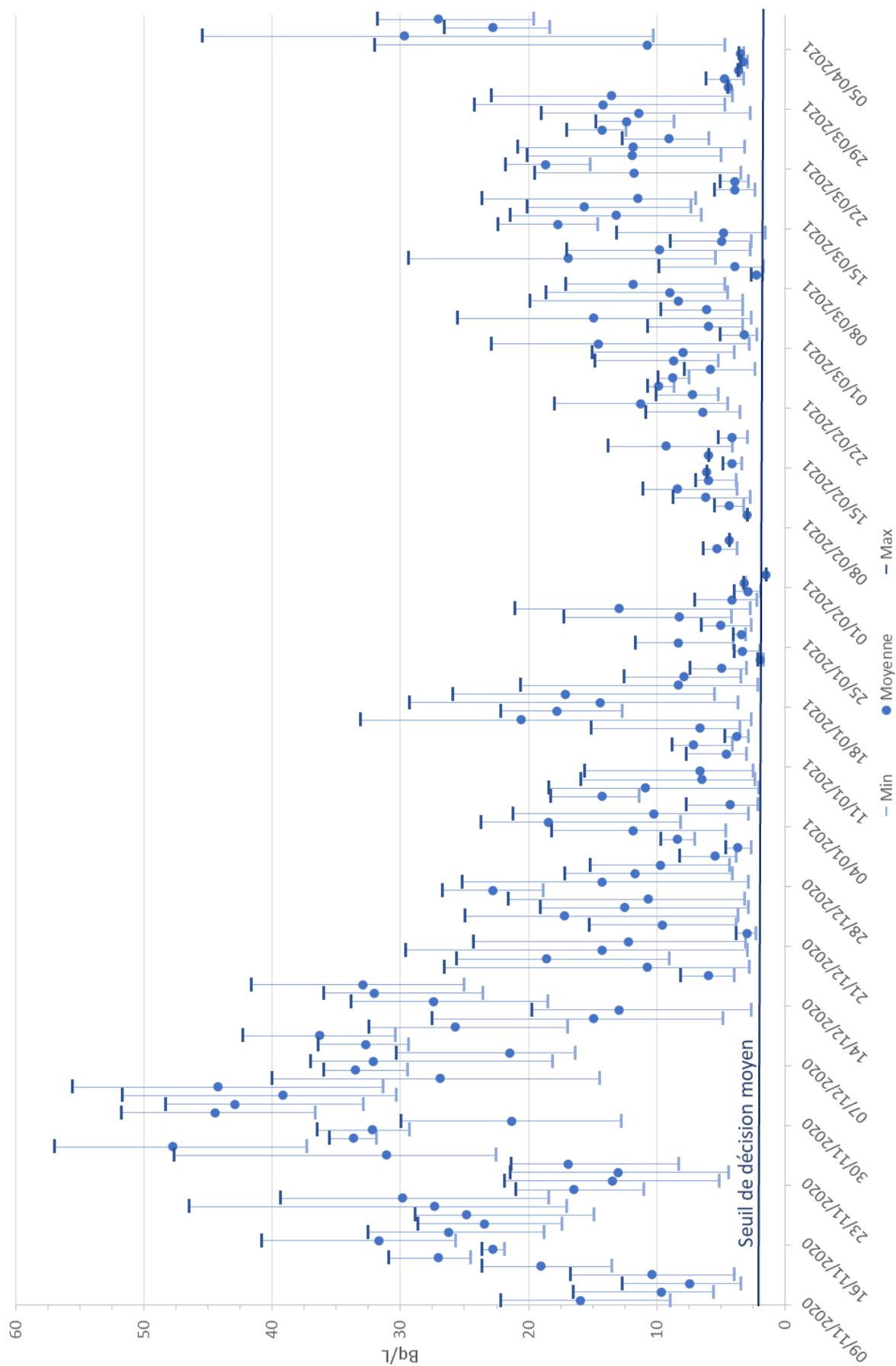


Figure 64 : Gammes de concentrations quotidiennes en tritium au pont Cessart entre le 9 novembre 2020 et le 8 avril 2021

Au cours de la campagne, les concentrations en tritium mesurées au pont Cessart ont varié entre le seuil de décision (en moyenne de 2,3 Bq/L) et la valeur maximale de 57 Bq/L.

On observe une alternance des maximums de concentrations en rive droite ou gauche et plus rarement au centre du cours d'eau, comme illustrés sur la Figure 63 par les bandes respectivement orange, grises et bleues.

Les concentrations relevées au centre de la Loire lorsqu'elles ne sont pas maximales sont la plupart du temps entre les mesures des deux rives de sorte qu'on observe un gradient latéral des concentrations.

Lors de la période de crue, du fait de l'arrêt des rejets par les centrales de la Loire et la Vienne (voir tableau ci-dessous), la plupart des résultats restent inférieurs au seuil de décision.

Tableau 24 : Date et heure d'arrêt et de reprise des rejets d'effluents radioactifs durant la crue de la Loire

CNPE	Date et heure d'arrêt et de reprise des rejets d'effluents radioactifs liquides
Belleville	04/02/21 à 19h00 au 23/02/21 à 15h19
Dampierre	04/02/21 à 21h00 au 07/02/21 à 4h00
Saint-Laurent	04/02/21 à 21h00 au 08/02/21 à 10h30
Chinon	28/01/21 à 7h07 au 10/02/21 à 10h02
Civaux	28/01/21 à 16h00 au 09/02/21 à 03h20

La représentation des écarts entre les concentrations quotidiennes maximales et minimales permet de mettre en évidence la dispersion transversale des concentrations qui varie au cours du temps et atteint un écart maximum de 39 Bq/L entre la rive droite et la rive gauche le 16 décembre 2020.

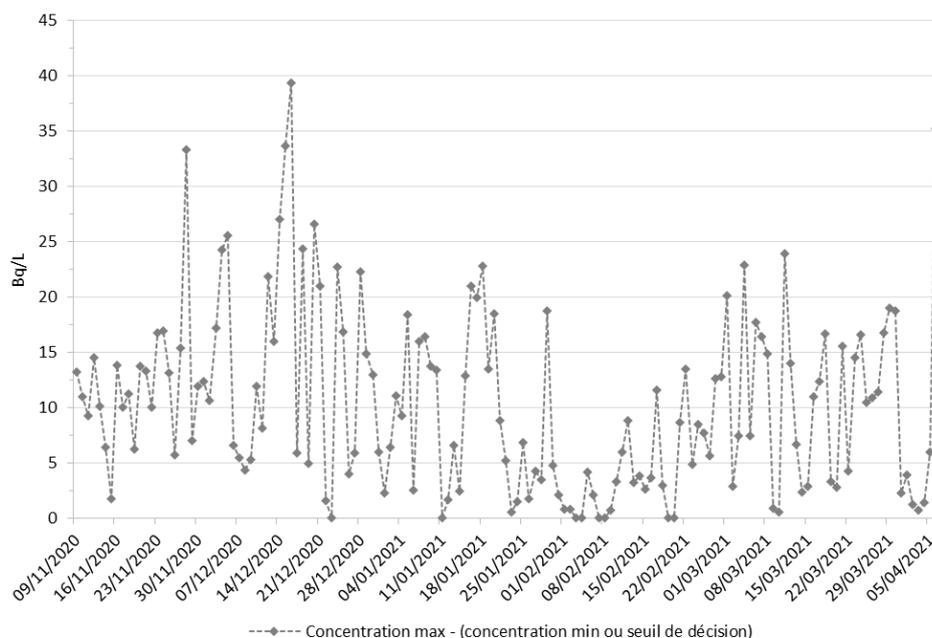


Figure 65 : Ecart entre les concentrations quotidiennes maximales et minimales mesurées en tritium au niveau du pont Cessart sur une plage de prélèvement de 30 minutes

Cette représentation graphique met en évidence que les concentrations sont rarement homogènes au sein de la Loire au pont Cessart.

Les gammes de concentrations en tritium représentées par point de prélèvement permettent de montrer que, sur l'ensemble de la campagne, la variabilité des résultats est plus importante en rive droite, où l'on observe les valeurs maximales et un grand nombre de valeurs inférieures à 10 Bq/L. Les moyennes sont en revanche légèrement supérieures en rive gauche où la fluctuation des concentrations est un peu moins marquée.

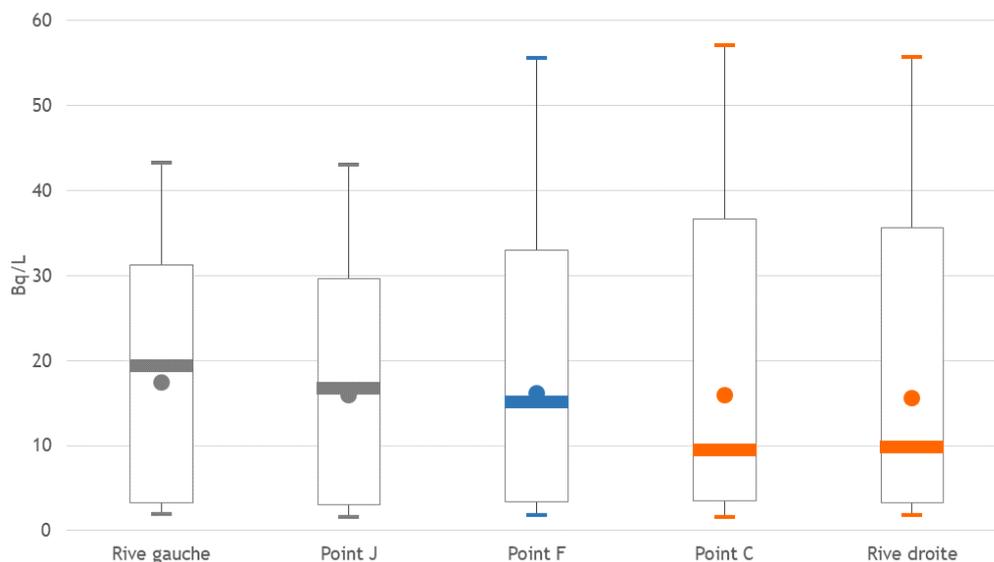


Figure 66 : Gammes de concentrations significatives (supérieures aux seuils de décision) en tritium mesurées au pont Cessart au cours de la campagne

NB : Les mesures aux points rive droite et rive gauche comprennent à la fois les mesures sur les prélèvements réalisés par les hydrocollecteurs et sur ceux réalisés depuis le pont respectivement aux points A et L en remplacement des hydrocollecteurs retirés lors de la crue.

L'analyse des fréquences par gamme de concentrations et par point de prélèvement confirme ces tendances. Elle montre également que le centre du cours d'eau présente des caractéristiques des deux rives, avec des valeurs ponctuellement élevées mais avec une disparité moins importante qu'en rive droite.

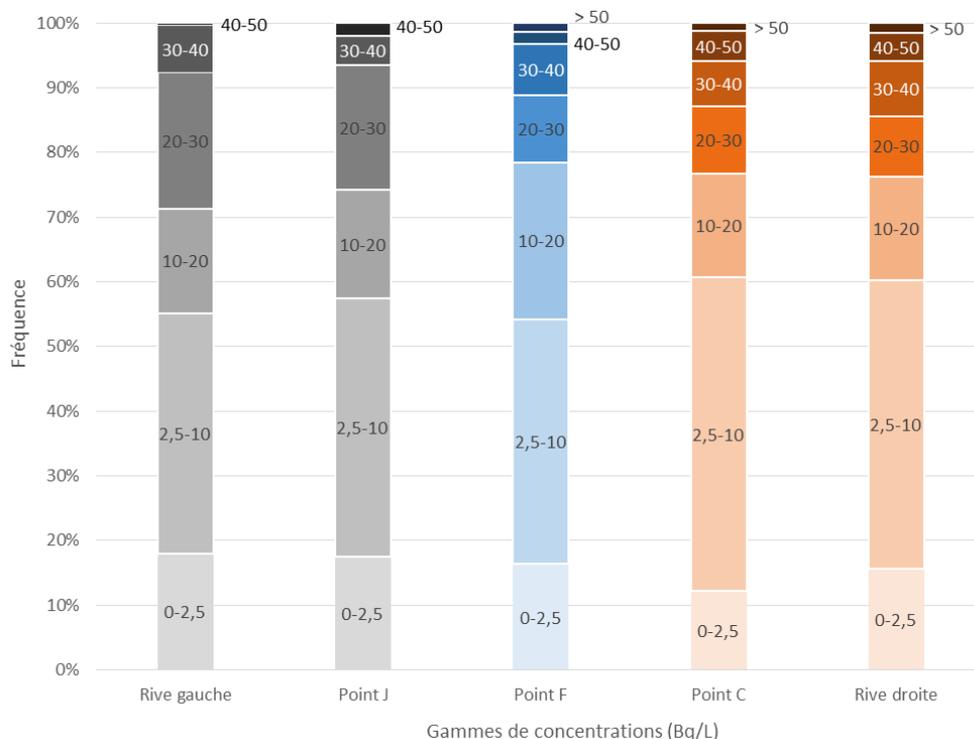


Figure 67 : Fréquences des gammes de concentrations en tritium en fonction du point de prélèvement

NB : Ces données comprennent également les valeurs de bruit de fond inférieures à 2,3 Bq/L. Les données en rive droite correspondent aux données de l'hydrocollecteur et du point A et en rive gauche à celles de l'hydrocollecteur et du point L.

Mesure de température et stratification thermique

Pendant la campagne de mesures au pont Cessart, l'eau de la Loire a été prélevée au seau tous les matins vers 9 h 30, dans les 50 premiers centimètres de la Loire environ, en 3 points du pont (points C, F et J). Pendant l'interruption de prélèvement par les hydrocollecteurs durant la période de crue, ces derniers ont alors été remplacés par des prélèvements manuels aux points A, C, F, J et L (voir chapitre 2.3). Chaque prélèvement a fait l'objet d'une mesure de la température de l'eau, avec une restitution à 0,5°C près en général.



Figure 68 : Prise de température sur un prélèvement d'eau au pont Cessart pendant la campagne

Par ailleurs, la DREAL Pays de la Loire effectue depuis 2016 des mesures « en continu » (toutes les 10 minutes) de la température de la Loire à Saumur au niveau du pont Cessart, au moyen d'une sonde fixe, au fond, en rive droite, avec une résolution de 0,1°C.

Dans sa note d'information du 19/07/2019, l'IRSN émettait l'hypothèse que la zone de mélange des rejets pouvait être déplacée vers l'aval du fleuve du fait d'un phénomène de stratification thermique : au mois de janvier 2019, la température du fleuve était de 5-6°C, quand les rejets d'effluents ont usuellement une température de l'ordre de 20°C. L'accès à ces deux types de chroniques de température de l'eau de la Loire – proche de la surface et au fond - permet d'appréhender une éventuelle stratification thermique au niveau du pont Cessart. Les résultats de mesure de température de l'IRSN et de la DREAL Pays de la Loire sur la période de la campagne de prélèvements de l'IRSN sont reportés ci-dessous :

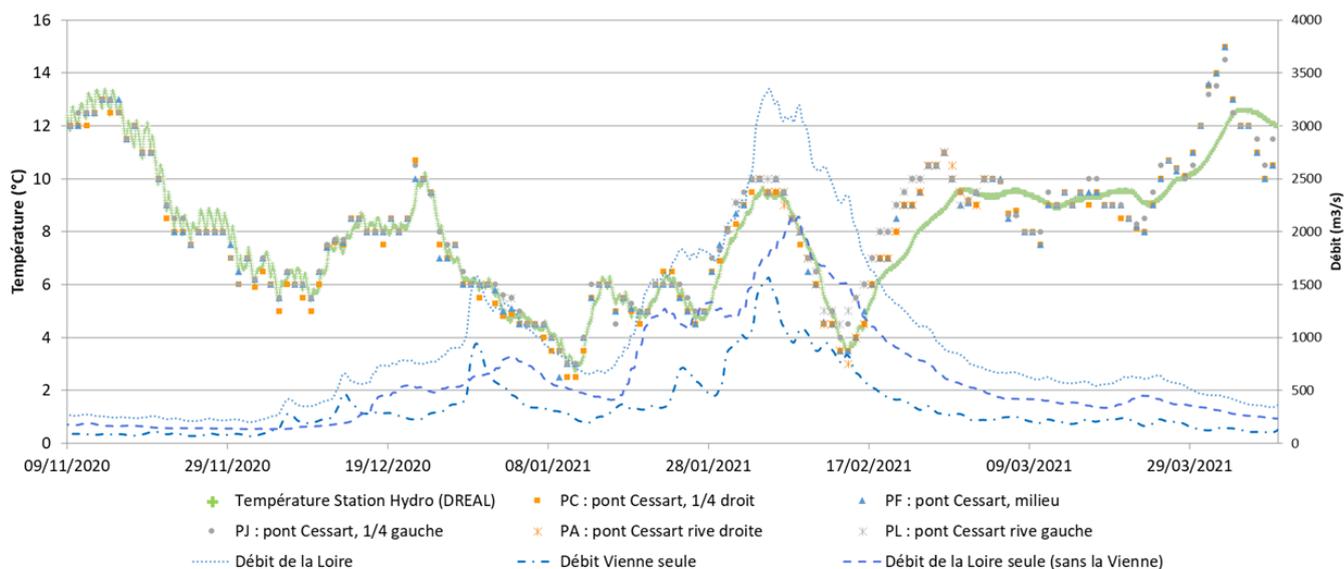


Figure 69 : Mesures de température de la Loire au pont Cessart à Saumur du 9 novembre 2020 au 8 avril 2021 i) par l'IRSN, sur les prélèvements d'eau de Loire, à proximité de la surface et ii) par la DREAL Pays de la Loire via une sonde fixe au fond, en rive droite

De novembre 2020 à fin janvier 2021, on n'observe pas d'écart notable de température entre le fond (mesures DREAL) et à proximité de la surface (mesures IRSN). Cette période couvre une large gamme de débits et de hauteurs d'eau (la hauteur mesurée à la station HYDRO de Saumur variant de -43 cm à +300 cm sur cette période), et pour des températures variant de 2,5 à 13°C.

En revanche, des écarts notables entre la température au fond et à la surface apparaissent depuis février 2021, jusqu'à 3°C. Ces écarts ne sont pas corrélés aux débits ou aux hauteurs d'eau. Une éventuelle dérive des sondes utilisées pour les mesures de l'IRSN a été jugée improbable : les mesures ont été effectuées par quatre préleveurs distincts utilisant chacun leur propre instrument de mesure, de sorte qu'il aurait fallu une dérive de toutes les sondes employées sur la période allant de février à la fin de la campagne. Concernant les mesures « en continu » de la DREAL, on constate qu'une variabilité diurne est observée au fond (de façon plus ou moins marquée mais pouvant atteindre un degré) jusqu'à la dernière semaine de janvier 2021. Elle n'est en revanche plus visible à partir de la toute fin janvier 2021, ce qui correspond à la période de crue de la Loire. Ceci pouvant suggérer un ensablement de la sonde du fait de la crue, une vérification sur site a été menée par la DREAL le 07/05/21 et a mis en évidence un ensablement de la sonde. S'il n'est pas possible de connaître la date de survenue de l'ensablement, on peut raisonnablement attribuer à ce dernier les écarts de température entre la surface et le fond à compter de février 2021, les mesures de la sonde au fond de la Loire ne mesurant sans doute plus convenablement la température de l'eau de la Loire. Il n'est donc pas tenu compte dans l'analyse comparative des 2 types de mesures de la période allant de février à avril 2021.

Sur la période de la campagne, de novembre 2020 à avril 2021, les températures dans les prélèvements proches de la surface au milieu du pont – où passent la majorité des panaches du CNPE de Chinon (voir ci-après) – ne montrent pas d'écart systématique avec les températures mesurées des côtés gauche et droit alors qu'une stratification thermique devrait s'accompagner d'une augmentation de la température proche de la surface au lieu de passage de ces panaches. De plus, de novembre 2020 à fin janvier 2021, avant l'ensablement de la sonde de la DREAL, les mesures de températures sur les prélèvements sont proches des mesures de la sonde au fond en rive droite. En ce sens, il n'a pas été mis en évidence de phénomène de stratification thermique au niveau du pont Cessart au cours de cette campagne.

Au cours de la campagne de mesure, il n'a pas été mis en évidence de phénomènes de stratification thermique entre l'eau du fond et l'eau proche de la surface au niveau du pont Cessart.

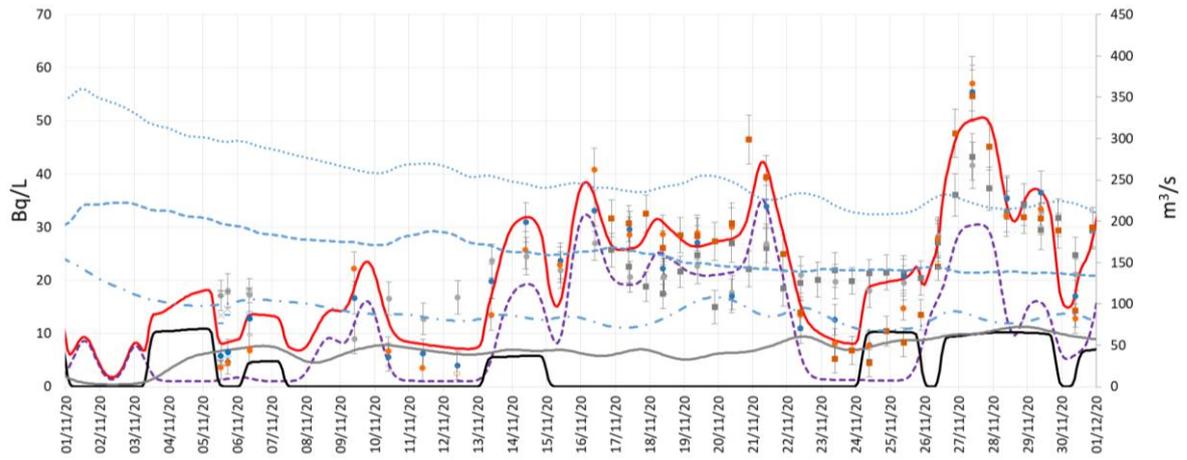
— Comparaison entre la modélisation 1D et les mesures IRSN au pont Cessart

Comme indiqué au paragraphe dédié aux calculs 1D (voir chapitre 2.4), deux situations simplifiées ont été investiguées afin d'affiner les interprétations de la comparaison modèle-mesure au niveau du pont Cessart à Saumur.

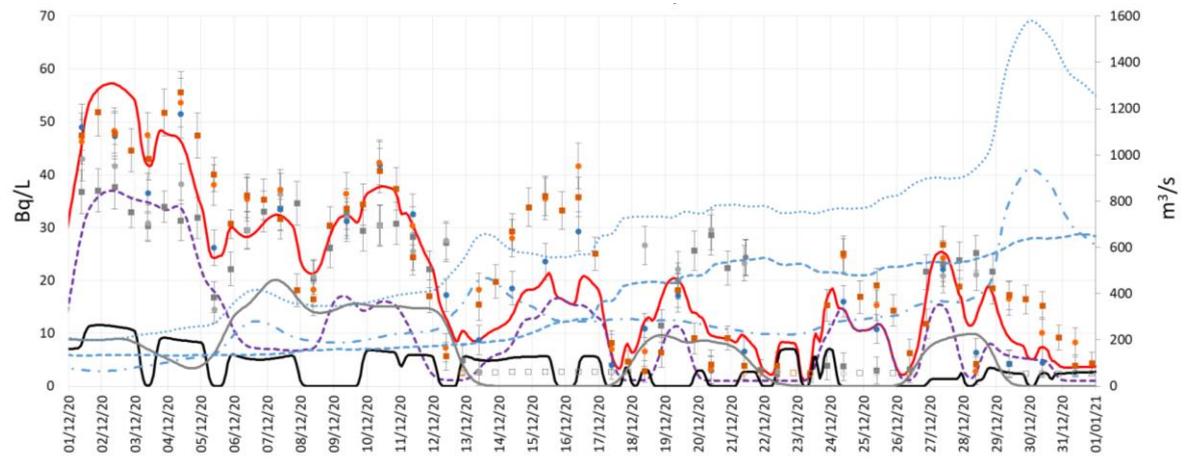
Première situation : la Vienne et la Loire sont deux cours d'eau parfaitement mélangés au niveau de Saumur

Dans ce cas, la concentration en tritium modélisée au niveau du pont Cessart est la somme des contributions du CNPE de Civaux (en tenant compte de leur dilution par les eaux de la Loire en aval de la confluence) et des CNPE de la Loire (en tenant compte de leur dilution par les eaux de la Vienne en aval de la confluence). Les résultats des simulations 1D au niveau du pont Cessart sont présentés par mois de novembre 2020 à avril 2021 dans les graphes de la Figure 70, en distinguant la concentration totale en tritium attendue - en moyenne sur la hauteur et la largeur de la Loire, étant donné l'hypothèse de « bon mélange » utilisée (courbe rouge), la contribution des rejets du CNPE de Chinon (courbe noire), la contribution cumulée des rejets des CNPE amont – Belleville, Dampierre et Saint Laurent – (courbe en pointillé violette) et la contribution des rejets du CNPE de Civaux. Pour aider à l'analyse des résultats, la courbe du débit simulé de la Loire au niveau de Saumur a été ajoutée (courbe bleue en pointillé), ainsi que les contributions à ce débit de la Vienne (courbe bleue alternant tirets et pointillés) et celui de la Loire « seule » provenant de l'amont de la confluence avec la Vienne (courbe bleue avec les tirets). Ces résultats de simulation peuvent être comparés aux mesures sur les prélèvements effectués lors de la campagne, également reportés sur ces graphes.

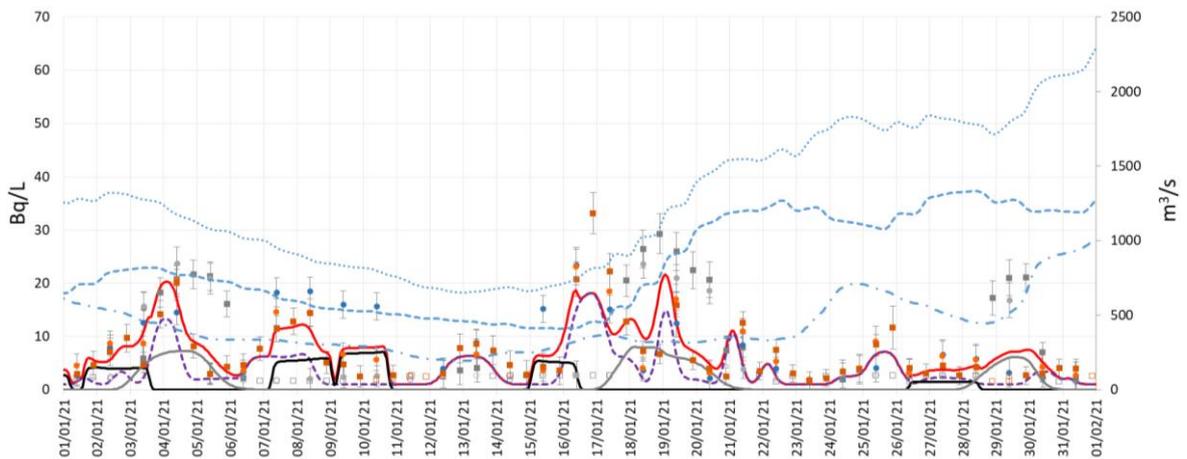
NOVEMBRE 2020



DECEMBRE 2020



JANVIER 2021

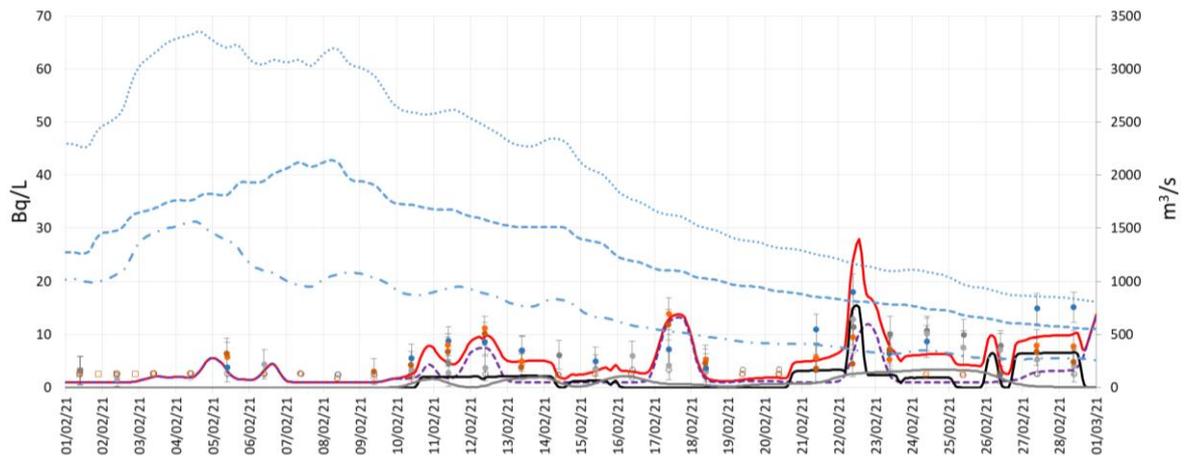


- HG : hydrocollecteur rive gauche
- PL : pont Cessart rive gauche
- PJ : pont Cessart, 1/4 gauche
- PF : pont Cessart, milieu
- PC : pont Cessart, 1/4 droit
- PA : pont Cessart rive droite
- HD : hydrocollecteur rive droite
- HG : hydrocollecteur rive gauche (seuil de décision)
- PL : pont Cessart rive gauche (seuil de décision)
- PJ : pont Cessart, 1/4 gauche (seuil de décision)
- PF : pont Cessart, milieu (seuil de décision)
- PC : pont Cessart, 1/4 droit (seuil de décision)
- PA : pont Cessart rive droite (seuil de décision)
- HD : hydrocollecteur rive droite (seuil de décision)

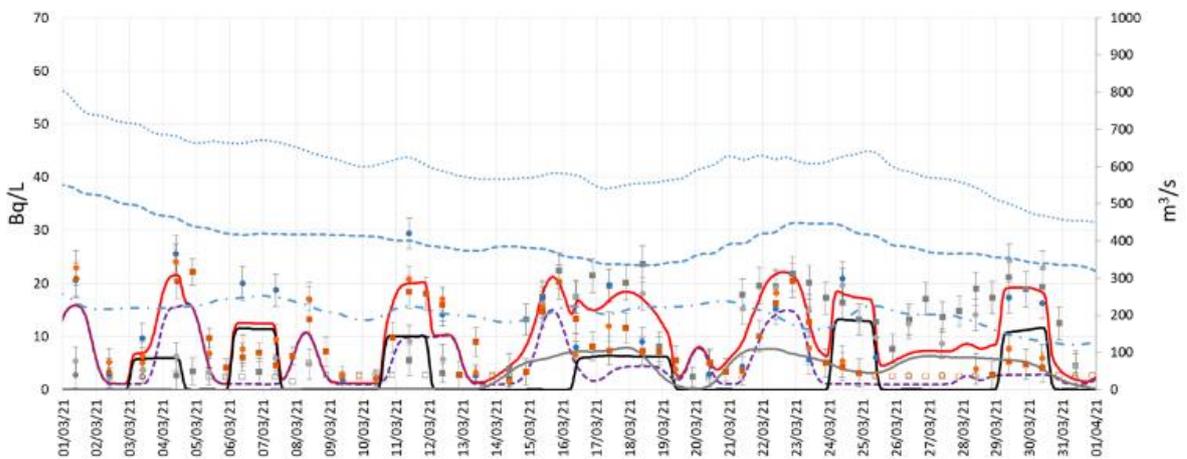
Modélisation SYMBIOSE (bon mélange)

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond)
- Contribution Chinon
- Contribution Civaux
- Débit de la Loire
- Débit de la Vienne seule
- Débit de la Loire seule (sans la Vienne)

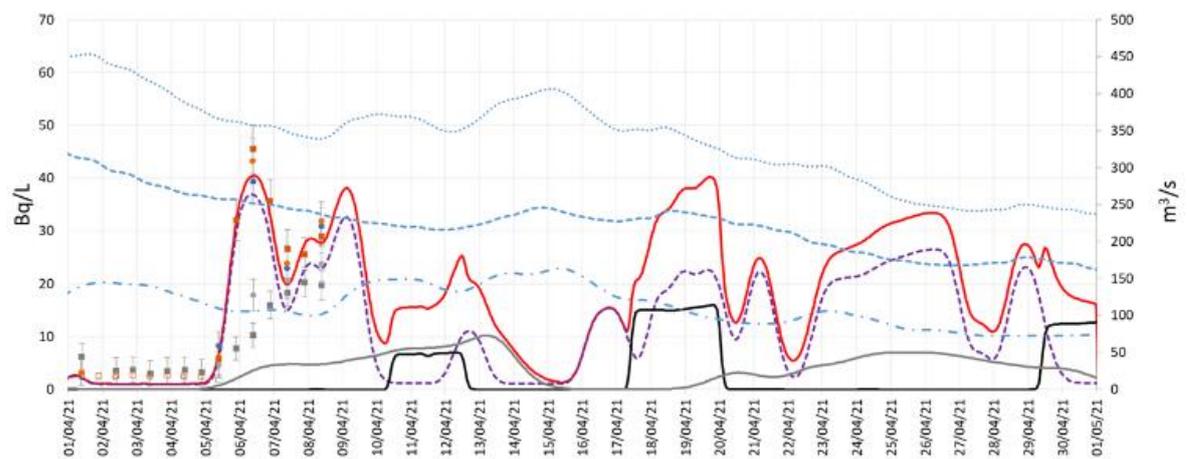
FEVRIER 2021



MARS 2021



AVRIL 2021



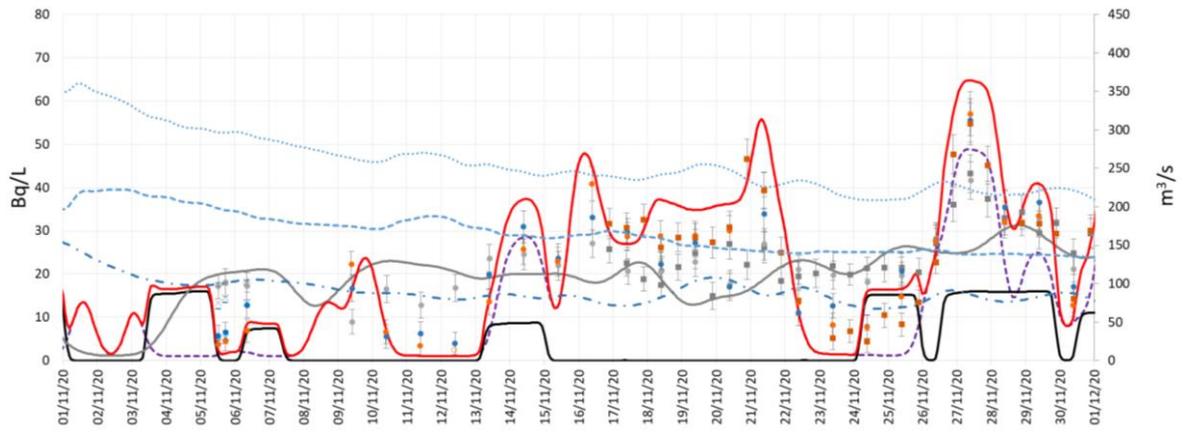
- Modélisation SYMBIOSE (bon mélange)**
- HG : hydrocollecteur rive gauche
 - PL : pont Cessart rive gauche
 - PJ : pont Cessart, 1/4 gauche
 - PF : pont Cessart, milieu
 - PC : pont Cessart, 1/4 droit
 - PA : pont Cessart rive droite
 - HD : hydrocollecteur rive droite
 - HG : hydrocollecteur rive gauche (seuil de décision)
 - PL : pont Cessart rive gauche (seuil de décision)
 - PJ : pont Cessart, 1/4 gauche (seuil de décision)
 - PF : pont Cessart, milieu (seuil de décision)
 - PC : pont Cessart, 1/4 droit (seuil de décision)
 - PA : pont Cessart rive droite (seuil de décision)
 - HD : hydrocollecteur rive droite (seuil de décision)
 - Total (tous CNPE et bruit de fond)
 - Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond)
 - Contribution Chinon
 - Contribution Civaux
 - Débit de la Loire
 - Débit de la Vienne seule
 - Débit de la Loire seule (sans la Vienne)

Figure 70 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D, en supposant que Loire et Vienne sont mélangées, et concentration mesurée, entre novembre 2020 et avril 2021

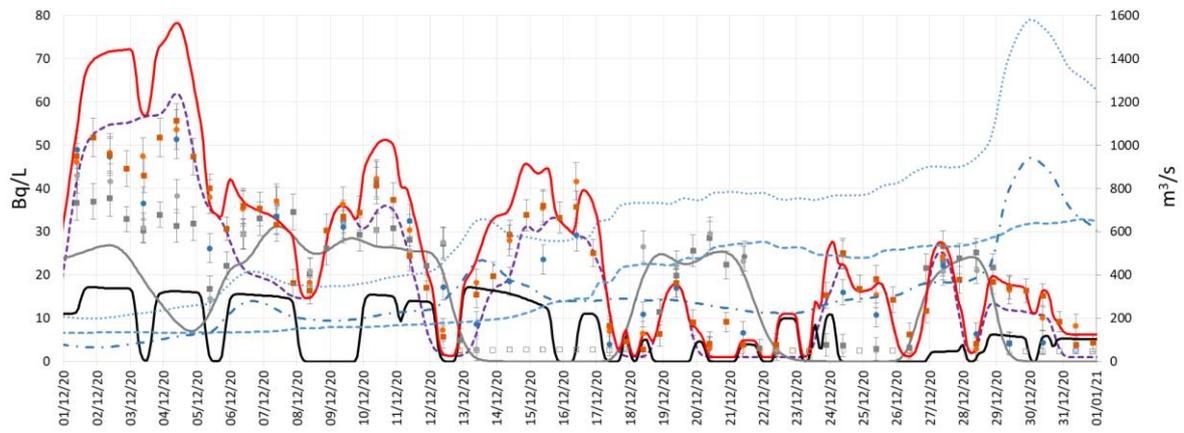
Seconde situation : la Vienne et la Loire sont deux cours d'eau qui ne sont pas mélangés au niveau de Saumur

Les résultats de simulation du modèle sont présentés par mois dans les graphes de la Figure 71 ci-dessous, présentés mois par mois de novembre 2020 à avril 2021. Dans cette seconde situation, on ne modélise plus une concentration "totale" à Saumur, mais la concentration due aux rejets de Civaux d'une part, portée par la Vienne, sans dilution par les eaux de la Loire en aval de la confluence (courbe grise), et la concentration due aux rejets des CNPE de la Loire d'autre part, portée par la Loire, sans dilution par les eaux de la Vienne en aval de la confluence (courbe rouge), avec la contribution de Chinon (courbe noire) et la contribution des autres CNPE amont sur la Loire (courbe en pointillés violets). Pour aider à l'analyse des résultats, la courbe du débit simulé de la Loire au niveau de Saumur a été ajoutée (courbe bleue en pointillés), ainsi que les contributions à ce débit de la Vienne (courbe bleue alternant tirets et pointillés) et celui de la Loire « seule » provenant de l'amont de la confluence avec la Vienne (courbe bleue avec les tirets). Ces résultats de simulation peuvent être comparés aux mesures sur les prélèvements effectués lors de la campagne, également reportés sur ces graphes.

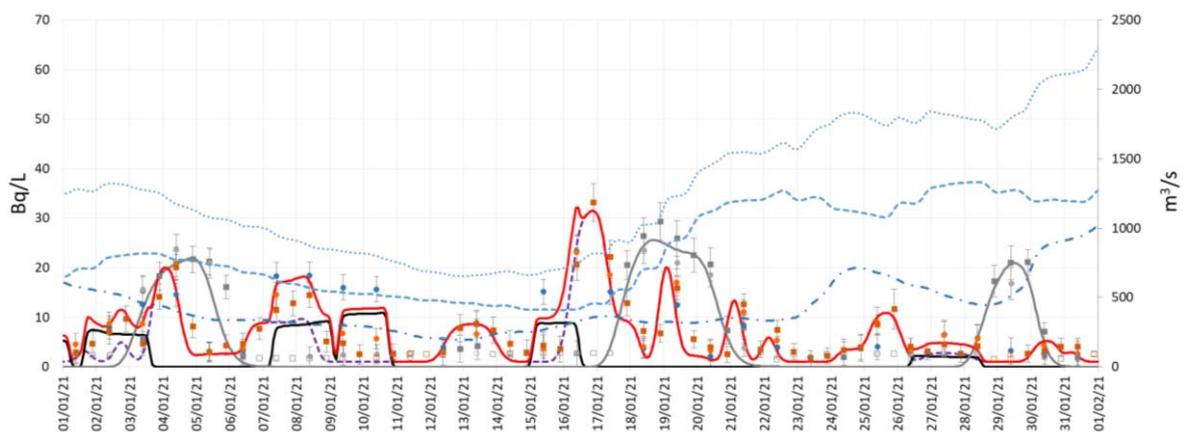
NOVEMBRE 2020



DECEMBRE 2020

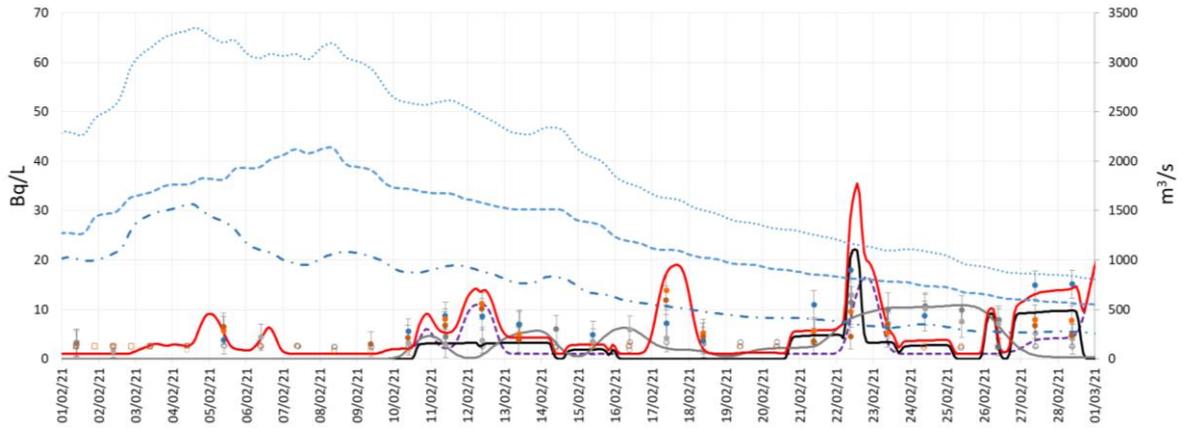


JANVIER 2021

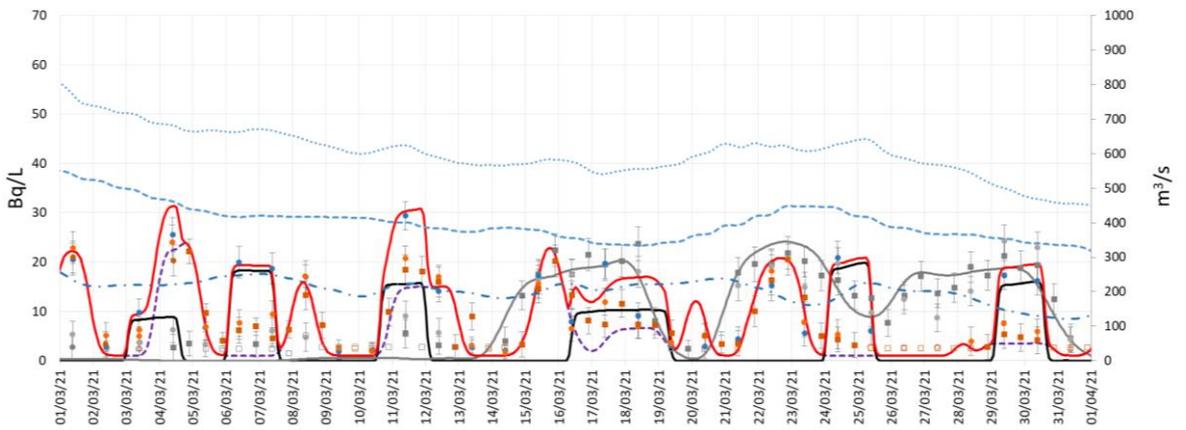


- | | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| Mesures | | Modélisation SYMBIOSE (bon mélange des rejets de Chinon à l'amont de la Vienne) | |
| ■ HG : hydrocollecteur rive gauche | □ HG : hydrocollecteur rive gauche (seuil de décision) | — Total CNPE Loire seule (sans Civaux) et bruit de fond | — Débit de la Loire seule (sans la Vienne) |
| ● PL : pont Cessart rive gauche | ○ PL : pont Cessart rive gauche (seuil de décision) | — Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond, Loire seule) | — Débit de la Vienne seule |
| ● PJ : pont Cessart, 1/4 gauche | ○ PJ : pont Cessart, 1/4 gauche (seuil de décision) | — Contribution Chinon (Loire seule) | — Débit de la Loire |
| ● PF : pont Cessart, milieu | ○ PF : pont Cessart, milieu (seuil de décision) | — Contribution Civaux (Vienne seule) | |
| ● PC : pont Cessart, 1/4 droit | ○ PC : pont Cessart, 1/4 droit (seuil de décision) | | |
| ● PA : pont Cessart rive droite | ○ PA : pont Cessart rive droite (seuil de décision) | | |
| ● HD : hydrocollecteur rive droite | ○ HD : hydrocollecteur rive droite (seuil de décision) | | |

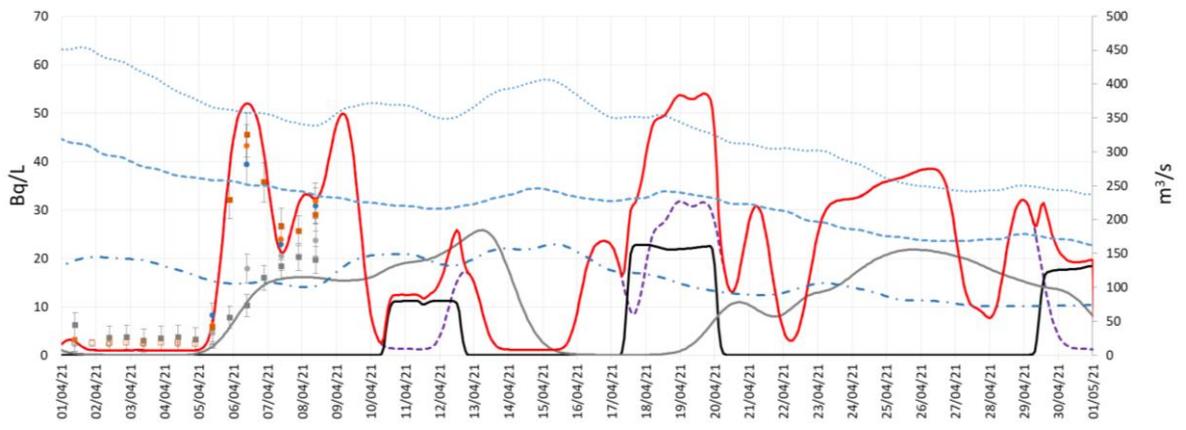
FEVRIER 2021



MARS 2021



AVRIL 2021



- Mesures**
- HG : hydrocollecteur rive gauche
 - PL : pont Cessart rive gauche
 - PJ : pont Cessart, 1/4 gauche
 - PF : pont Cessart, milieu
 - PC : pont Cessart, 1/4 droit
 - PA : pont Cessart rive droite
 - HD : hydrocollecteur rive droite
 - HG : hydrocollecteur rive gauche (seuil de décision)
 - PL : pont Cessart rive gauche (seuil de décision)
 - PJ : pont Cessart, 1/4 gauche (seuil de décision)
 - PF : pont Cessart, milieu (seuil de décision)
 - PC : pont Cessart, 1/4 droit (seuil de décision)
 - PA : pont Cessart rive droite (seuil de décision)
 - HD : hydrocollecteur rive droite (seuil de décision)
- Modélisation SYMBIOSE (bon mélange des rejets de Chinon à l'amont de la Vienne)**
- Total CNPE Loire seule (sans Civaux) et bruit de fond
 - - - Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond, Loire seule)
 - Contribution Chinon (Loire seule)
 - Contribution Civaux (Vienne seule)
 - - - Débit de la Loire seule (sans la Vienne)
 - - - Débit de la Vienne seule
 - Débit de la Loire

Figure 71 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D, en supposant que Loire et Vienne ne sont pas mélangées, et concentration mesurée, entre novembre 2020 et avril 2021

Dans l'ensemble, les simulations et les mesures de concentration en tritium dans l'eau sont du même ordre et évoluent selon les mêmes tendances, même si des écarts parfois importants peuvent s'observer, notamment avec le scénario où la Loire et la Vienne sont supposées homogénéisées et quand une dispersion des mesures sur la largeur du pont est observée – situation qu'un modèle 1D ne peut, par essence, reproduire.

L'analyse croisée des mesures et des simulations permet de tirer des enseignements sur la dynamique du mélange de la Vienne et de la Loire d'une part, et sur l'origine du tritium détecté au pont Cessart en fonction des rejets des CNPE et des conditions hydrauliques d'autre part.

Ainsi, on observe que du côté rive gauche de la Loire à Saumur, la masse d'eau est très majoritairement issue de la Vienne. En effet, les mesures de ce côté sont inférieures à, ou proches de, la limite de détection en l'absence de rejets du CNPE de Civaux. Aussi, elles sont proches des concentrations attendues des rejets du CNPE de Civaux prédits par la modélisation sans mélange des eaux de la Loire et de la Vienne, et ce quels que soient les rejets des autres CNPE de la Loire.

Le côté rive droite de la Loire est sous l'influence des CNPE amont de la Loire, partiellement sous influence du CNPE de Chinon et peu influencé par la Vienne : les mesures du côté rive droite sont en effet généralement comprises entre la contribution des CNPE amont de Chinon et la contribution des CNPE de la Loire prédites par la modélisation sans mélange des eaux de la Loire et de la Vienne.

Il apparaît que les concentrations en tritium au milieu du pont Cessart sont influencées par les rejets de tous les CNPE. En l'absence de rejet de Chinon, les mesures au milieu du pont sont le plus souvent proches de celles du côté rive droite, donc sous influence des rejets des CNPE de la Loire à l'amont de Chinon, et parfois entre celles du côté rive droite et rive gauche, donc sous influence des rejets de CNPE amont de la Loire et de Civaux. En présence des rejets de Chinon, les mesures au milieu de la Loire sont le plus souvent proches de, ou supérieures à, la contribution attendue de tous les CNPE de la Loire avec le modèle sans mélange de la Loire et de la Vienne, marquant l'influence de tous les CNPE de la Loire au milieu du pont.

Les faibles débits semblent favoriser le mélange de la Loire et de la Vienne. En effet, entre fin novembre et début décembre 2020, quand les débits sont les plus faibles, de l'ordre de 200 m³/s :

- les mesures côté rive gauche, au milieu et côté rive droite de la Loire se rapprochent, malgré des contributions attendues parfois très différentes de Civaux d'une part et des CNPE de la Loire d'autre part ;
- la modélisation supposant que la Loire et la Vienne se mélangent est la plus adaptée, avec une concentration totale prédite qui s'approche du niveau des mesures.

Les mécanismes sous-jacents pourraient être des rétrécissements localisés du lit du fleuve, qui favoriseraient ce mélange, conjugués à des vitesses beaucoup plus faibles du courant en l'absence de rétrécissement du lit, favorisant les phénomènes de diffusion latérale par rapport aux effets de transport (le temps nécessaire à la masse d'eau pour parcourir une distance donnée étant plus élevé et les effets de diffusion ayant plus de temps pour s'établir).

Quand la Vienne est le principal contributeur au débit de la Loire au niveau du pont Cessart, elle s'étale vers le milieu du pont, comme par exemple en décembre 2020. Les mesures au milieu du pont sont « tirées » vers les mesures de la rive gauche car l'influence des rejets de Civaux est alors plus forte au milieu du pont.

Les rejets de Chinon ne sont pas toujours complètement mélangés au niveau du pont Cessart à Saumur. En effet, à certaines dates où seuls les rejets de Chinon sont attendus à Saumur, les mesures au milieu du pont sont supérieures à la concentration attendue par les modélisations 1D, qui supposent le mélange homogène des rejets des CNPE au pont Cessart à Saumur.

CONCLUSIONS DE L'INTERPRETATION DES MESURES A SAUMUR À L'AIDE DE LA MODÉLISATION 1D

Les rejets de Chinon ne sont pas toujours complètement mélangés au niveau du pont Cessart à Saumur.

La modélisation 1D rend bien compte de l'évolution de la concentration en tritium mesurée au pont Cessart, en supposant que la Loire et la Vienne ne se mélangent pas pour la plupart des régimes hydrauliques. Lorsque les débits sont particulièrement faibles, la Loire et la Vienne semblent mieux mélangées, de sorte que la modélisation supposant le mélange des deux cours d'eau est la plus adaptée.

— Comparaison entre la modélisation 2D et les mesures ACRO et IRSN au pont Cessart

Cette section présente la confrontation du modèle 2D à des mesures de concentrations en tritium réalisées au pont Cessart à Saumur par l'ACRO et lors de la campagne de mesures de l'IRSN. L'objectif est de tester la capacité du modèle à reproduire l'hétérogénéité des concentrations sur le transect du pont Cessart à partir de mesures indépendantes des traçages EDF.

Mesures de l'ACRO et de la campagne de mesure IRSN

Le modèle est confronté à des séries de mesures de l'ACRO qui, pour une même date, couvrent plusieurs points de prélèvement au pont Cessart.

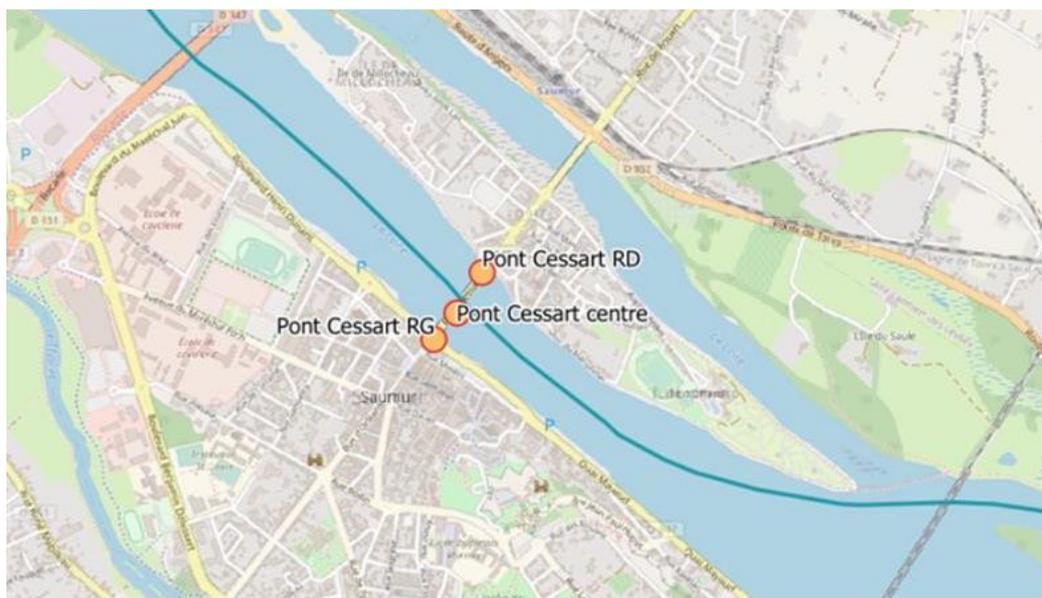


Figure 72 : Points de prélèvement de l'ACRO au pont Cessart (rapport ACRO du 6 octobre 2020)

Les dates retenues, la localisation des points et les concentrations mesurées sont détaillées ci-dessous.

Tableau 25 : Dates et concentrations en tritium (Bq/L) des mesures ACRO retenues pour la comparaison avec le modèle 2D

Date	Rive gauche	Milieu	Rive droite
16/06/2019	20,1	-	20,8
23/10/2019	25,6	52	40,4
24/11/2019	22,1	24,2	26,8
18/12/2019	5	5	6,7
30/01/2020	5	5	5,3
27/02/2020	18,4	7,2 - 5	5

NB : Les heures de prélèvement n'étant pas précisées, celles-ci sont positionnées par défaut à midi.

Pour la comparaison avec les mesures de la campagne IRSN, l'objectif est de couvrir différentes situations de dispersion au niveau des cinq points de la Loire régulièrement échantillonnés sous le pont Cessart (Tableau 26) et de modéliser les deux campagnes de mesures au cours desquelles les prélèvements au pont Cessart ont été répartis en douze points (Figure 60). Les données retenues pour les prélèvements en cinq points sont détaillées dans le tableau suivant :

Tableau 26 : Dates et concentrations en tritium (Bq/L) des mesures IRSN en 5 points retenues pour la comparaison avec le modèle 2D

Date et heure	Rive gauche	¼ rive gauche	Milieu	¼ rive droite	Rive droite
27/11/2020 9 h 30	43,2	41,6	55,47	57	54,68
11/02/2021 9 h 30	4,57	2,74	8,73	8,03	6,75
06/03/2021 9 h 30	< 2,3	6,12	19,96	7,63	6,12
27/03/2021 9 h 30	13,66	8,71	< 2,72	< 2,73	< 2,45

Tableau 27 : Dates et concentrations en tritium (Bq/L) des mesures IRSN en 12 points retenues pour la comparaison avec le modèle 2D

Date et heure	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
05/11/2020 12 h 25	2,83	5,50	3,67	4,78	4,63	5,78	6,34	11,89	13,45	17,16	17,11	17,99
05/11/2020 17 h 25	3,41	5,69	4,62	3,93	5,19	6,50	7,03	13,46	14,58	18,09	17,41	17,91
06/11/2020 08 h 35	5,07	6,35	6,86	7,31	13,34	12,86	13,59	17,37	18,23	17,21	18,05	18,43
12/04/2021 12 h 40	13,45	14,21	15,21	14,46	15,01	13,50	14,34	15,00	15,56	19,81	20,34	16,62
12/04/2021 15 h 40	14,88	15,82	15,66	13,88	17,54	14,53	16,52	15,99	17,19	17,49	20,66	18,12
13/04/2021 08 h 45	7,94	7,76	10,63	7,17	7,95	9,24	10,88	15,80	20,72	21,60	23,88	25,65

Paramétrage hydrographique

Pour ces comparaisons modèle-mesure, le domaine est modélisé avec la calibration du traçage EDF du 24 juin 2020 (voir annexe 10.4) qui est le seul calage disponible couvrant la Loire depuis le CNPE de Chinon jusqu'au pont Cessart à Saumur. Les différences de débits par rapport au débit du 24 juin 2020 ont été prises en compte en ajustant le paramètre de diffusion γ . Pour chaque cas, les valeurs ajustées de ce paramètre sont indiquées au Tableau 28 et au Tableau 29.

Paramétrage des débits

Pour les modélisations 2D, les débits exploités sont ceux de la Loire au niveau du CNPE de Chinon ($Q_{LoireAmont}$) et de la Vienne avant sa confluence avec la Loire (Q_{Vienne}). Pour chaque comparaison, ces valeurs de débits sont déduites des résultats des modélisations 1D réalisées avec l'outil SYMBIOSE.

Tableau 28 : Paramétrage des débits de la Loire Amont et de la Vienne et valeurs ajustées du paramètre de diffusion γ pour la comparaison du modèle 2D avec les mesures de l'ACRO

Date	$Q_{Loire\ amont}$ (m ³ /s)	Q_{Vienne} (m ³ /s)	Paramètre de diffusion (γ)
16/06/2019	124	100	0,4
23/10/2019	139	82	0,6
24/11/2019	312	240	0,6
18/12/2019	1360	850	0,6
30/01/2020	395	300	0,6
27/02/2020	460	202	0,6

Tableau 29 : Paramétrage des débits de la Loire Amont et de la Vienne et valeurs ajustées du paramètre de diffusion cy pour la comparaison du modèle 2D avec les mesures de l'IRSN

Date	Q _{Loire amont} (m ³ /s)	Q _{Vienne} (m ³ /s)	Paramètre de diffusion (cy)
27/11/2020	145	80	0,7
11/02/2021	1673	942	0,4
06/03/2021	415	248	0,4
27/03/2021	363	201	0,6
05/11/2020 – 12 :25	195	102	0,7
05/11/2020 – 17 :25	194	104	0,7
06/11/2020 – 08 :35	186	104	0,7
12/04/2021 – 12 :40	221	139	0,7
12/04/2021 – 15 :40	222	142	0,7
13/04/2021 – 08 :45	232	156	0,7

Paramétrage des sources de tritium

Les sources de tritium exploitées pour chaque calcul sont les concentrations dans la Loire à l'amont du CNPE de Chinon ($C_{LoireAmont}$ - Bq/L) et dans la Vienne à l'amont de sa confluence avec la Loire (C_{Vienne} - Bq/L) et le débit de rejet de chacune des 11 buses de la clarinette du CNPE de Chinon (q_{Rejet} - Bq/s). Ces données sont déterminées à partir des modélisations 1D à Saumur, sous l'hypothèse que la Loire et la Vienne ne se mélangent pas, des concentrations spécifiques aux apports de la Loire amont ($C_{Saumur_LoireAmont}$), de la Vienne (C_{Saumur_Vienne}) et du CNPE de Chinon (C_{Saumur_Chinon}). À partir de ces modélisations 1D, le paramétrage des concentrations de la Loire amont et de la Vienne et le débit de rejet de chacune des 11 buses de la clarinette du CNPE de Chinon sont respectivement donnés par les relations suivantes :

$$C_{LoireAmont} = C_{Saumur_LoireAmont} \cdot \frac{Q_{Saumur}}{Q_{LoireAmont}} \quad \text{Équation 1}$$

$$C_{Vienne} = C_{Saumur_Vienne} \cdot \frac{Q_{Saumur}}{Q_{Vienne}} \quad \text{Équation 2}$$

$$q_{Rejet} = \frac{C_{Saumur_Chinon} \cdot Q_{Saumur}}{11} \quad \text{Équation 3}$$

Avec : Q_{Saumur} le débit de la Loire (total) à Saumur (m³/s) et Q_{Vienne} la contribution de la Vienne au débit à Saumur (m³/s).

Les concentrations et débits de rejet déduits de ces relations et appliqués aux modélisations 2D à des fins de comparaison avec les mesures de l'ACRO et de l'IRSN sont respectivement indiqués dans les deux tableaux suivants :

Tableau 30 : Paramétrage des concentrations et débit de rejet à partir des modélisations 1D pour la comparaison du modèle 2D avec les mesures de l'ACRO

Date	C _{LoireAmont} (Bq/L)	C _{Vienne} (Bq/L)	q _{Rejet} (Bq/s)
16/06/2019	18	21	0,06.10 ⁶
23/10/2019	20	9	0,4.10 ⁶
24/11/2019	25	21	0
18/12/2019	7	8	0
30/01/2020	6	3	0
27/02/2020	5	18	0

Tableau 31 : Paramétrage des concentrations et débits de rejet à partir des modélisations 1D pour la comparaison du modèle 2D avec les mesures de l'IRSN

Date	C _{LoireAmont} (Bq/L)	C _{Vienne} (Bq/L)	q _{Rejet} (Bq/s)
27/11/2020	48	27	0,21.10 ⁶
11/02/2021	3,6	0,4 (2)	0,45.10 ⁶
06/03/2021	0 (2)	0 (2)	0,7.10 ⁶
27/03/2021	1 (2)	17,5	0
05/11/2020 – 12h25	2	21	0
05/11/2020 – 17h25	2	21	0
06/11/2020 – 08h35	2	21	0,13.10 ⁶
12/04/2021 – 12h40	15	24	0
12/04/2021 – 15h40	15	23	0
13/04/2021 – 08h45	8	27	0

NB : Lorsque la concentration est inférieure à 2 Bq/L, la valeur du bruit de fond de 2 Bq/L a été appliquée.

Résultats

Les figures suivantes présentent les résultats de la comparaison du modèle 2D aux mesures de l'ACRO et de l'IRSN à Saumur :

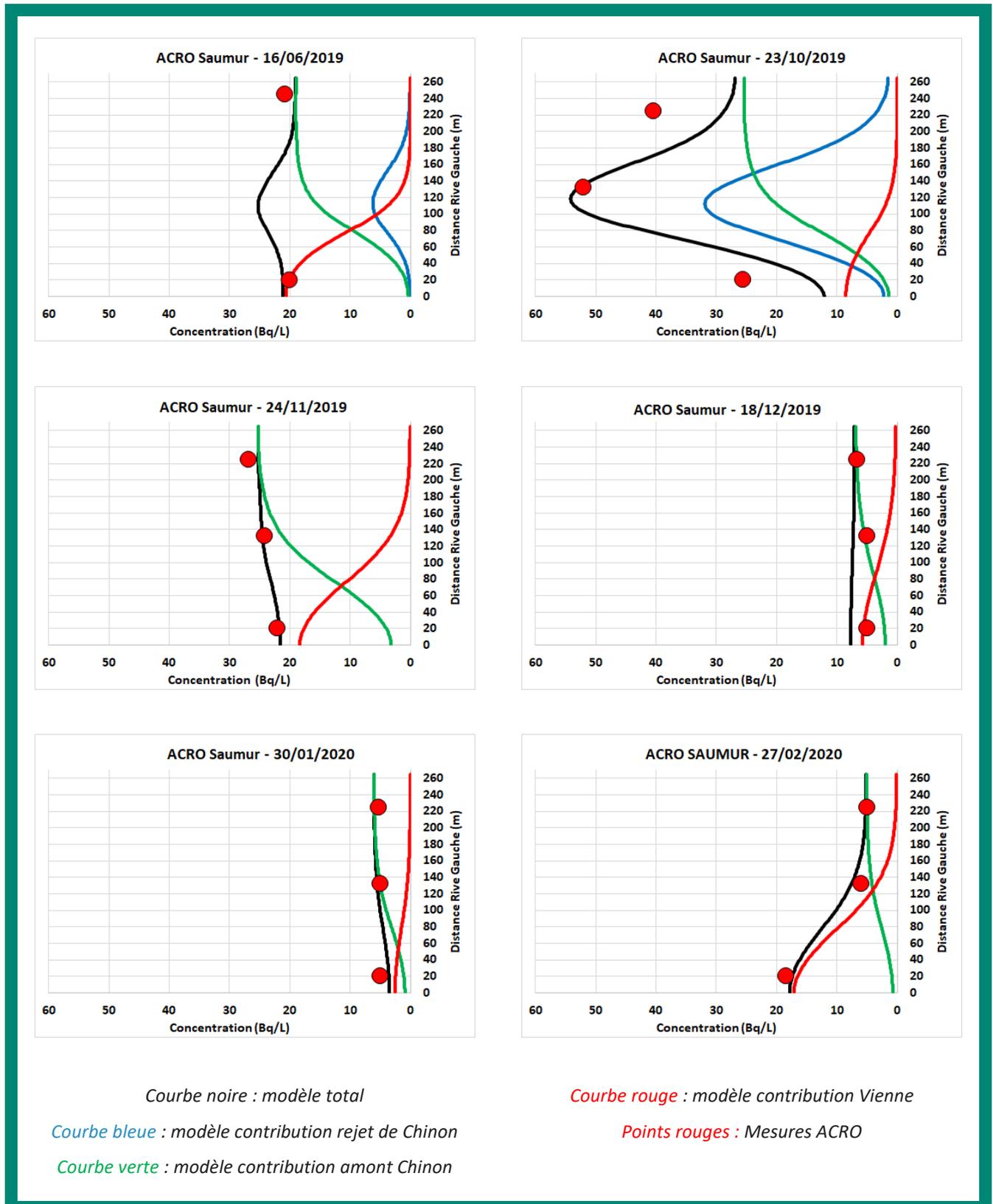
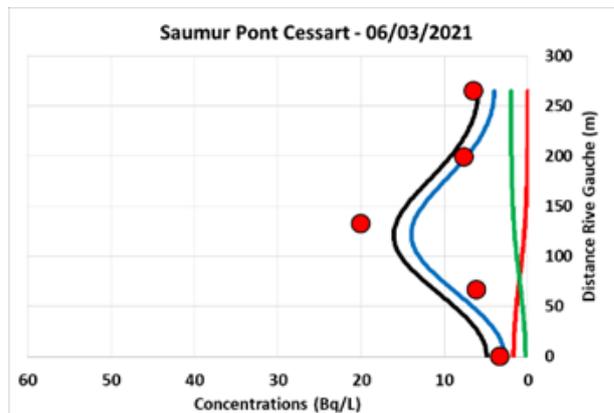
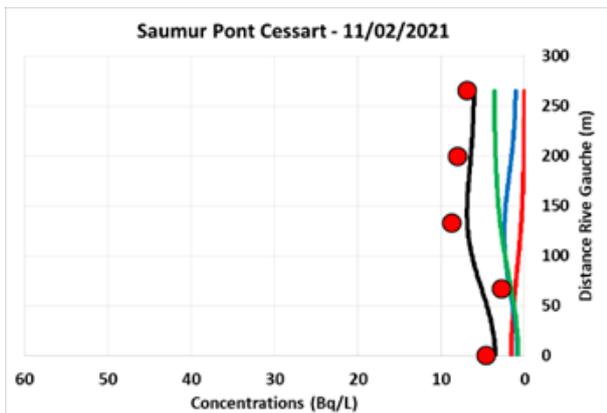
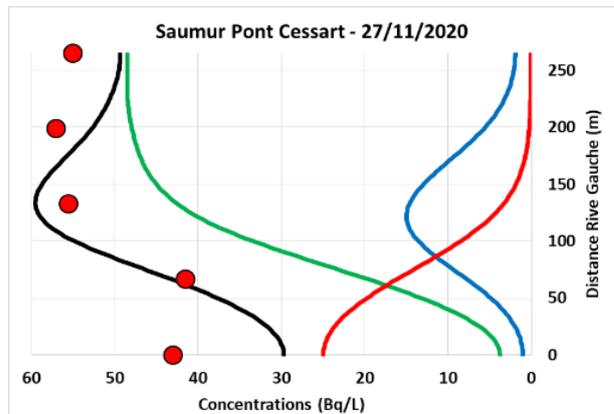
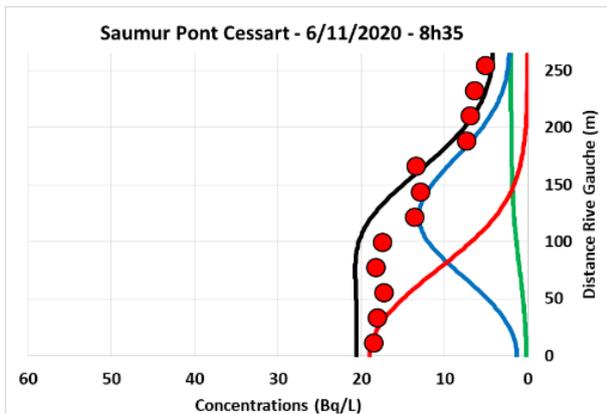
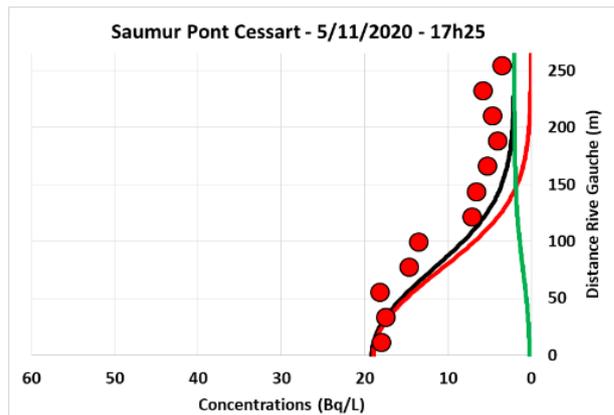
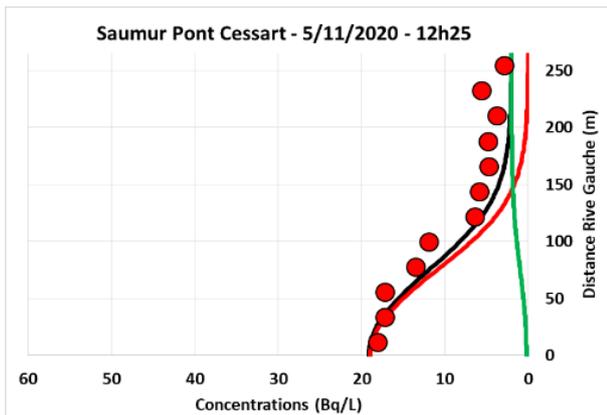


Figure 73 : Comparaison entre le modèle 2D et les mesures ACRO à Saumur



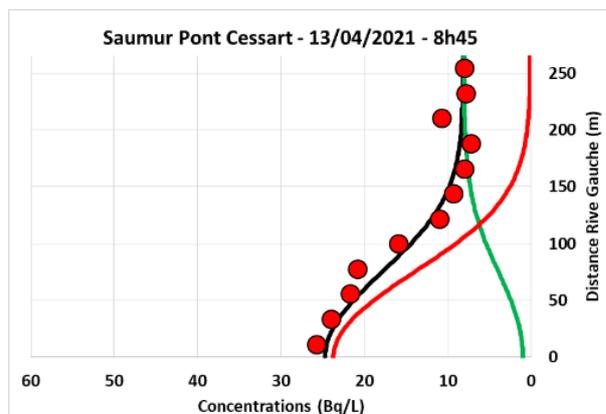
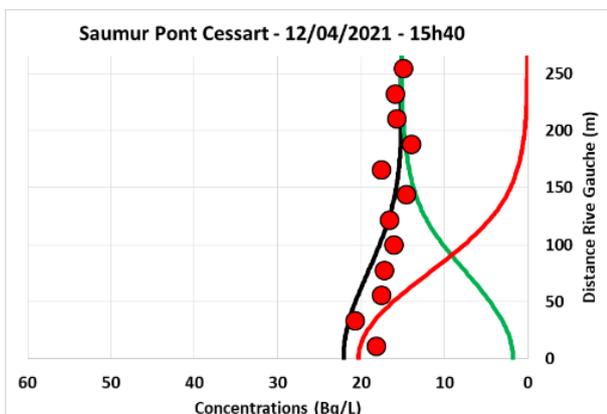
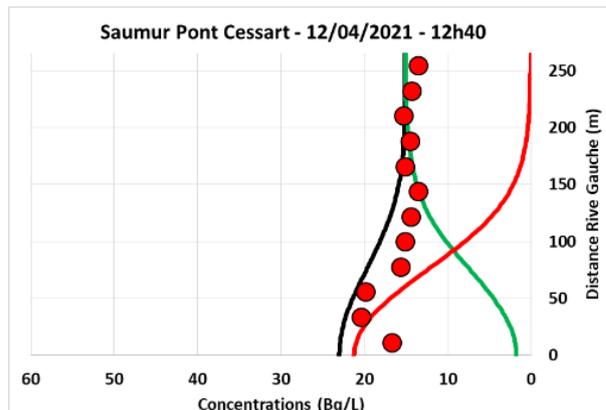
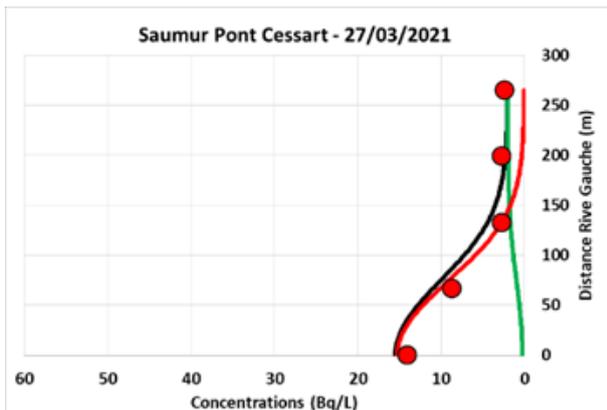
Courbe noire : modèle total

Courbe bleue : modèle contribution rejet de Chinon

Courbe verte : modèle contribution amont Chinon

Courbe rouge : modèle contribution Vienne

Points rouges : Mesures IRSN



Courbe noire : modèle total

Courbe bleue : modèle contribution rejet de Chinon

Courbe verte : modèle contribution amont Chinon

Courbe rouge : modèle contribution Vienne

Points rouges : Mesures IRSN

Figure 74 : Modèle 2D vs mesures de la campagne IRSN à Saumur

Pour l'ensemble des conditions testées, que ce soit pour les mesures de l'ACRO ou de la campagne IRSN, ces résultats montrent que la calibration du modèle 2D à partir des traçages EDF et son paramétrage à partir des modélisations 1D permettent d'identifier les contributeurs aux concentrations observées au transect de la Loire à Saumur.

Sur l'ensemble des mesures testées, la figure ci-dessous montre que le coefficient de détermination entre le modèle et les mesures est 0,92 pour un écart quadratique moyen (RMSE) de 3 Bq/L.

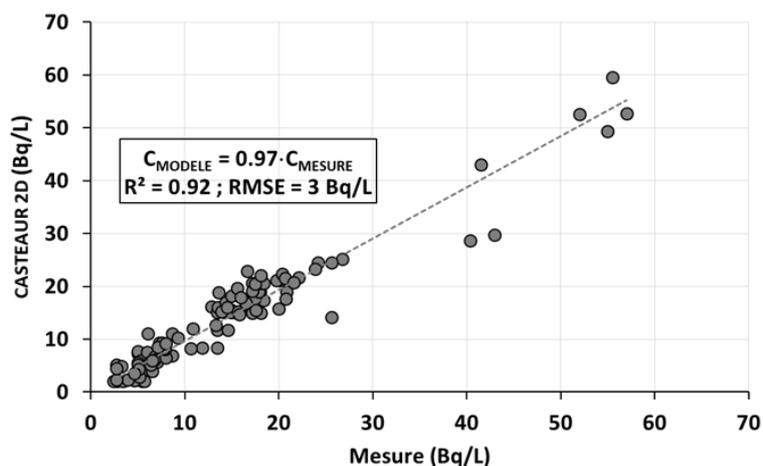


Figure 75 : Synthèse de la comparaison entre la modélisation 2D et les mesures ACRO et IRSN

CONCLUSIONS DE L'INTERPRETATION DES MESURES A SAUMUR À L'AIDE DE LA MODELISATION 2D

Ces résultats confortent les conclusions des modélisations 1D pour les dates étudiées, à savoir que les concentrations en tritium le long du transect de la Loire au pont Cessart sont principalement influencées par les apports de la Loire amont du côté de la rive droite, les apports de la Vienne du côté de la rive gauche et l'ensemble des sources au centre où se retrouve le plus souvent l'axe central des panaches des rejets du CNPE de Chinon.

D'un point de vue plus général, la cohérence d'ensemble entre le modèle 2D, les traçages EDF et les mesures de l'ACRO et de l'IRSN renforce la confiance dans la représentativité de ces mesures d'origines différentes.

4.2 A LA STATION MULTI-PARAMETRES AVAL DU CNPE DE CHINON

Mesures des concentrations en tritium et exploitation des résultats

Les mesures issues de la surveillance réglementaire, effectuées par EDF sur ses prélèvements à la SMP aval du CNPE de Chinon, sont accessibles via le Réseau National des Mesures de la radioactivité dans l'environnement (RNM). Il s'agit de deux chroniques de mesures, l'une portant sur des échantillons aliquotes moyens journaliers et l'autre sur des prélèvements à mi-rejet. Chaque jour, un échantillon aliquote moyen est constitué de 24 prélèvements horaires effectués par EDF à la SMP aval, de 10 h le jour J jusqu'à 10 h le jour J+1. La mesure effectuée sur l'échantillon aliquote moyen journalier est déclarée par EDF au RNM, attribuée au jour J+1. Cette mesure, représentative de la concentration de 10 h le jour J à 10 h le jour J+1, est présentée sur les graphes ci-après par un point rouge centré à 22 h le jour J : point plein lorsque la mesure est supérieure à la limite de détection, évidé lorsqu'elle est inférieure (on représente alors le seuil de décision).

Par ailleurs, EDF effectue un prélèvement à l'instant où la moitié du volume des effluents rejetés considérés a atteint la station multi-paramètres aval. La mesure réalisée par EDF sur ce prélèvement, dite à mi-rejet, est représentée sur les graphes par un point jaune centré arbitrairement à 12 h pour la date de prélèvement rapportée par EDF dans le RNM : point plein lorsque la mesure est supérieure à la limite de détection, évidé lorsqu'elle est inférieure (on représente alors le seuil de décision).

On dispose ainsi de 219 mesures de novembre 2020 à fin avril 2021, dont 182 sont des mesures sur les échantillons aliquotes moyens journaliers et 37 sur des prélèvements à mi-rejet. Parmi celles-ci, 147 (soit 67%) sont supérieures à la limite de détection (125 aliquotes et 22 mi-rejet) et 72 (soit 33%) inférieures à la limite de détection (57 aliquotes et 15 mi-rejet).

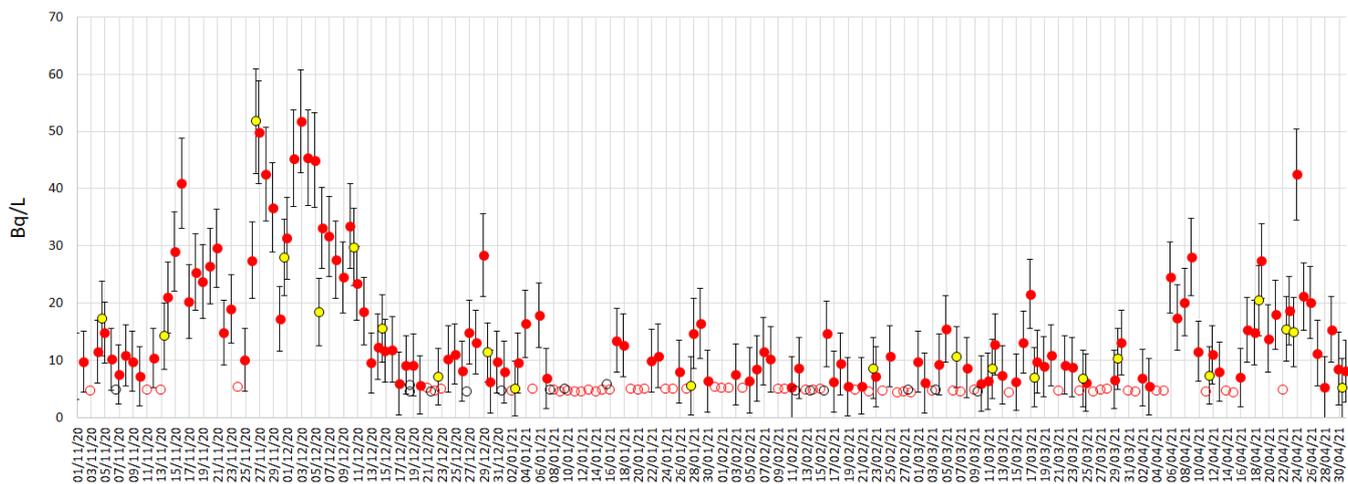


Figure 76 : Concentrations en tritium à la SMP aval de Chinon mesurées dans les prélèvements aliquotes moyens journaliers (les points rouges évidés sont les seuils de décision pour les mesures inférieures à la limite de détection) et débit de la Loire (pointillés bleus), de novembre 2020 et avril 2021

Les concentrations en tritium fluctuent au cours du temps, mais on peut noter de façon générale que les valeurs les plus fortes sont mesurées lorsque les débits de la Loire sont faibles.

Pour les mesures sur les échantillons aliquotes moyens journaliers :

- le maximum est de 51,7 Bq/L ;
- pour les seules mesures supérieures à la limite de décision : la moyenne est de 15,8 Bq/L, la médiane de 11,5 Bq/L et l'écart type de 10,8 Bq/L ;
- pour l'ensemble des mesures (en utilisant le seuil de décision pour les mesures inférieures à la limite de décision) : la moyenne est de 12,4 Bq/L, la médiane de 8,8 Bq/L et l'écart type de 10,2 Bq/L

Pour les mesures sur les prélèvements à mi-rejet :

- le maximum est de 51,8 Bq/L ;
- pour les seules mesures supérieures à la limite de décision : la moyenne est de 14,5 Bq/L, la médiane de 11 Bq/L et l'écart type de 10,8 Bq/L ;
- pour l'ensemble des mesures (en utilisant le seuil de décision pour les mesures inférieures à la limite de décision) : la moyenne est de 10,7 Bq/L, la médiane de 6,8 Bq/L et l'écart type de 9,5 Bq/L.

Représentativité de la SMP aval vis-à-vis des rejets du CNPE de Chinon

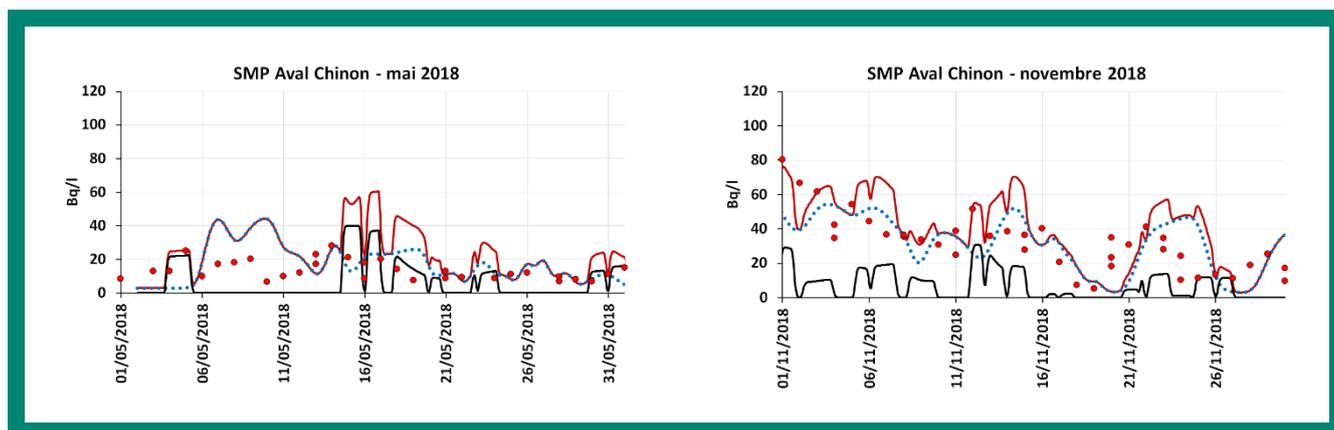
Rappel des résultats de l'étude préliminaire

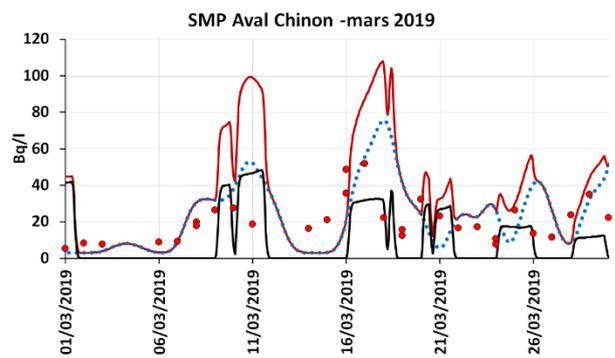
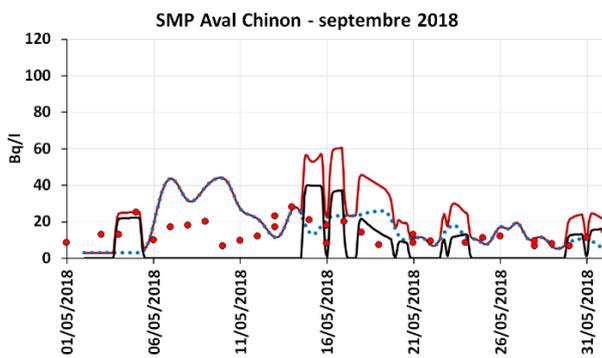
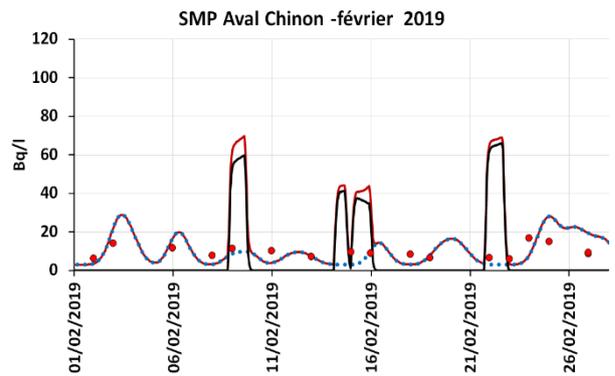
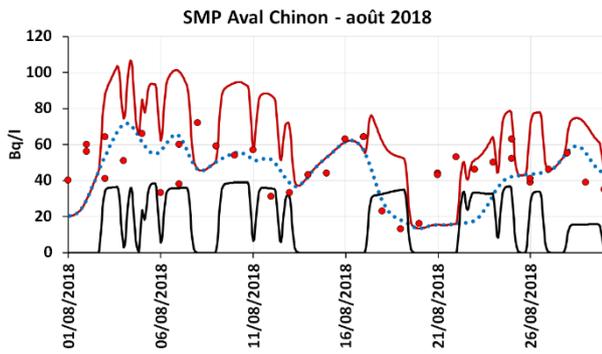
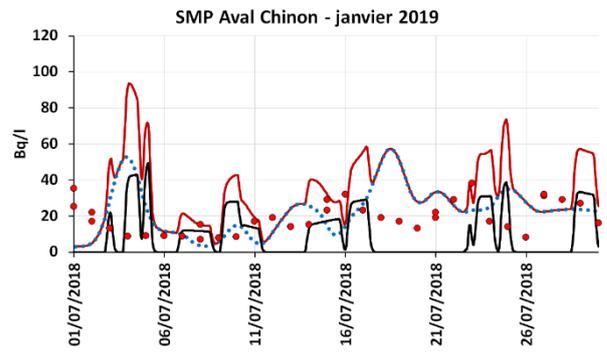
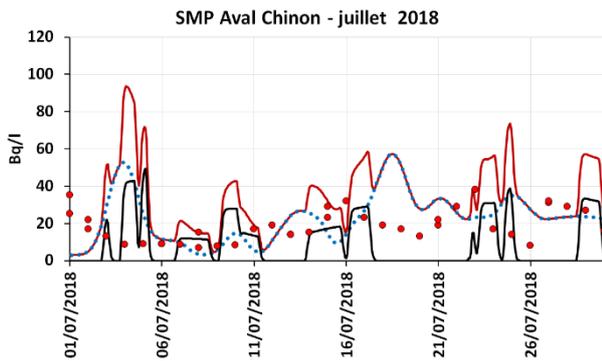
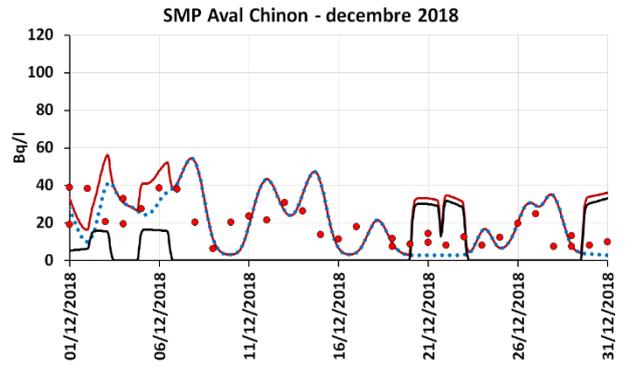
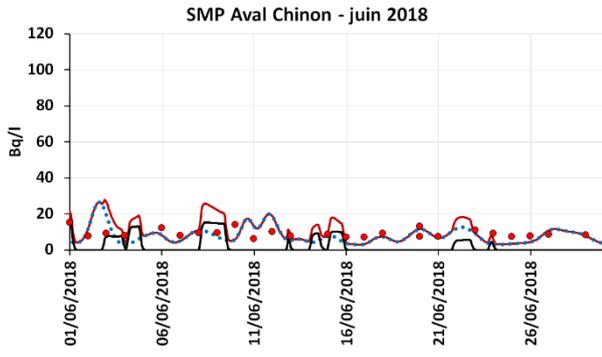
Le prélèvement à la SMP aval du CNPE de Chinon est positionné à 5 m de la rive gauche du bras gauche d'une île située à environ 6 km en aval du CNPE, juste en amont de la confluence avec la Vienne.



Figure 77 : Localisation de la SMP aval du CNPE de Chinon

Les premières modélisations 1D avec la version autonome de CASTEAUR effectuées sur la période de mai 2018 à mai 2019 ont montré que la surveillance à la station de surveillance aval du CNPE de Chinon n'était pas toujours en mesure de détecter les rejets du CNPE de Chinon (figure suivante).





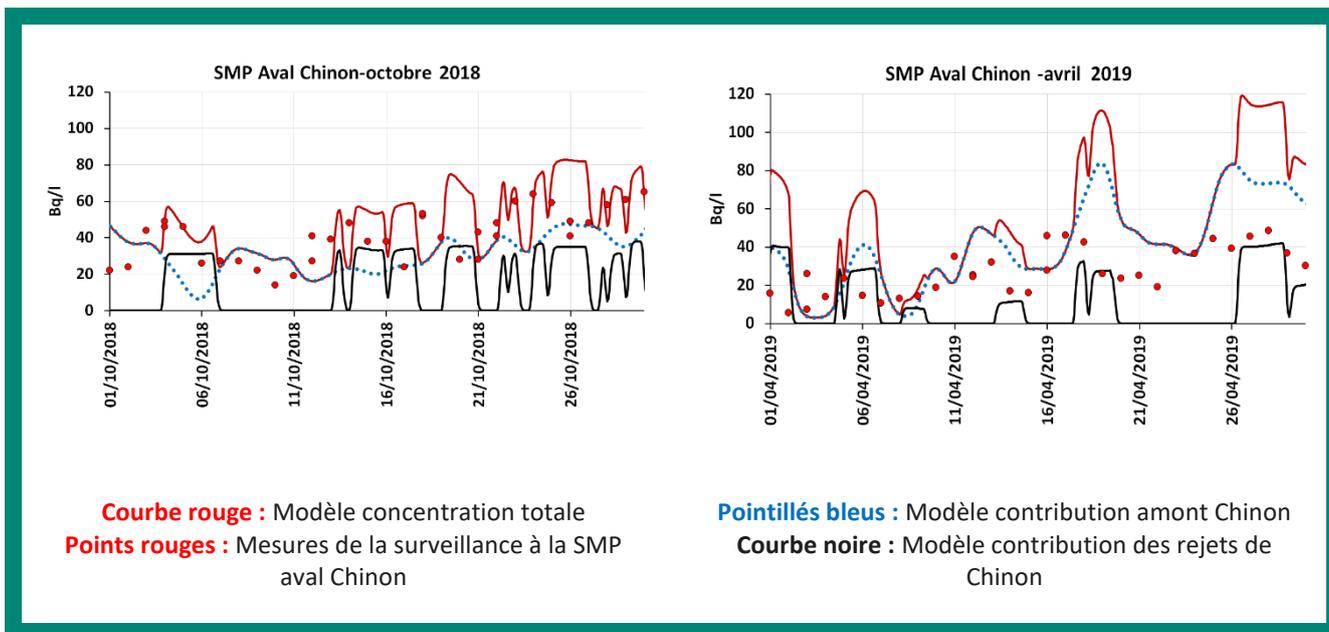


Figure 78 : Modélisation 1D vs Surveillance à la SMP aval de Chinon entre mai 2018 et mai 2019

En présence d'un rejet de Chinon, la Figure 78 montre que les concentrations mesurées à la SMP sont supérieures aux contributions des CNPE amont uniquement entre mi-août et mi-novembre 2018. En dehors de cette période, les mesures de la surveillance sont essentiellement représentatives des contributions des CNPE amont, ce qui ne leur permet pas de rendre compte des rejets de Chinon.

En complément, le recouplement avec les débits de la Loire suggère que les périodes de détection des rejets du CNPE de Chinon sont fortement corrélées aux débits de la Loire inférieurs à 100 m³/s.

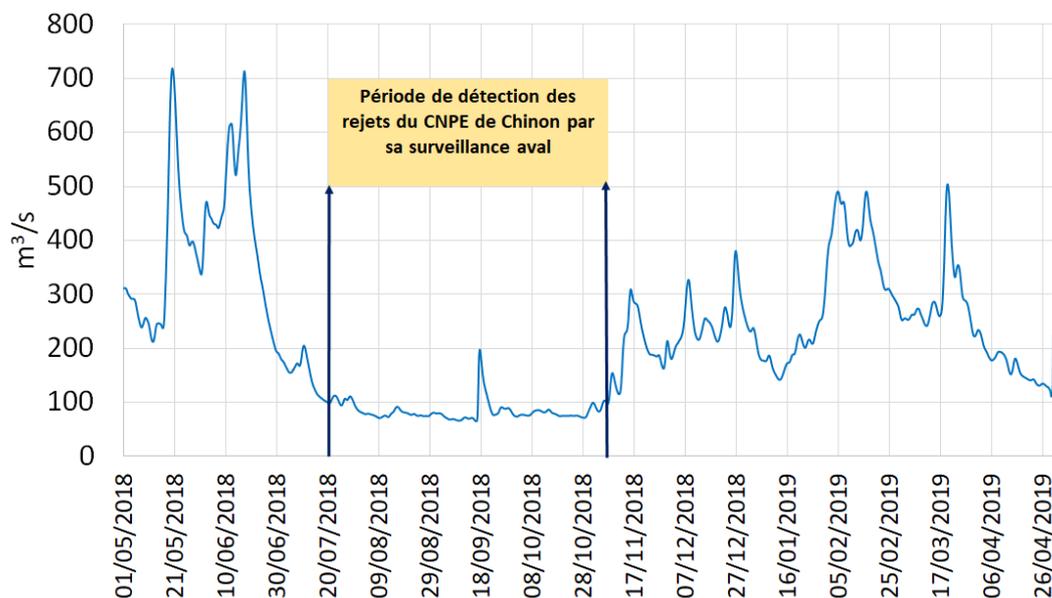


Figure 79 : Débit de la Loire à l'aval du CNPE de Chinon de mai 2018 à mai 2019

Cette corrélation est confortée par les traçages EDF au cours desquels les panaches des rejets de Chinon n'étaient pas homogénéisés au niveau de la SMP aval et les mesures issues de la surveillance étaient représentatives des rejets de Chinon uniquement pour le traçage du 25/10/2017 réalisé dans des conditions de débit de la Loire de 95 m³/s.

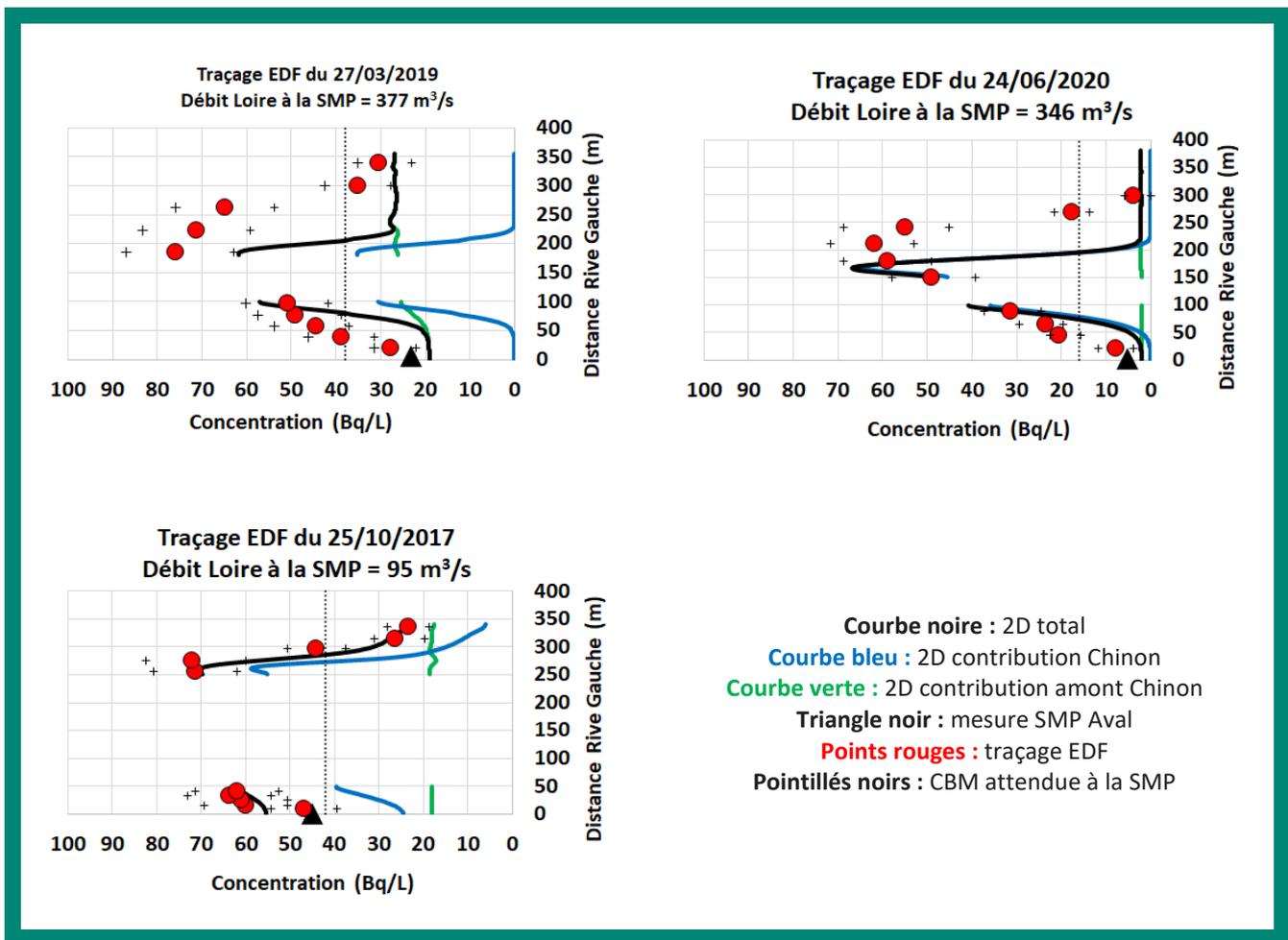


Figure 80 : Traçages EDF et modélisation 2D à la SMP aval du CNPE de Chinon

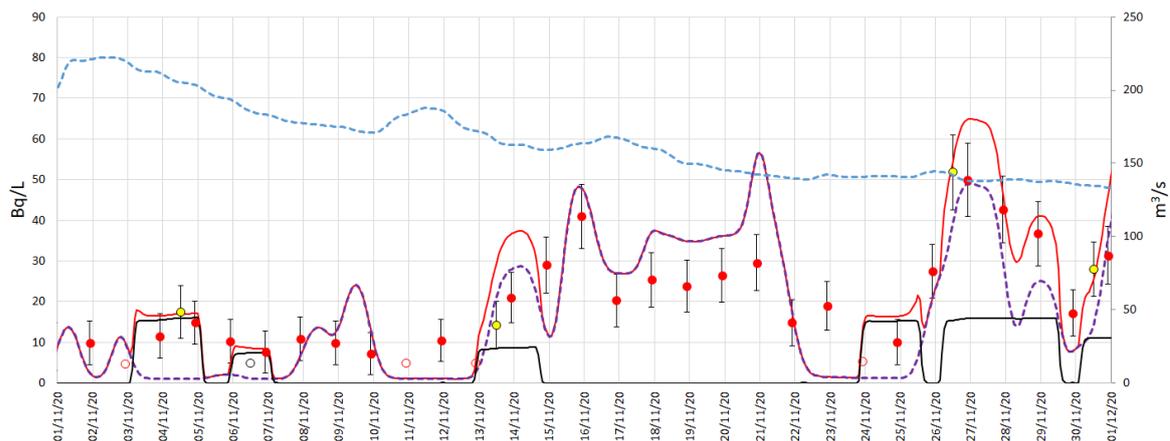
Tous ces résultats laissent penser que le mélange des rejets de Chinon est incomplet au niveau de la SMP aval. L'analyse des résultats de la surveillance EDF à la SMP pendant la campagne de mesures de l'IRSN couplée aux modélisations a permis d'affiner l'évaluation des capacités de la SMP à rendre compte des rejets du CNPE de Chinon à différents régimes hydrauliques de la Loire.

Comparaison entre la modélisation 1D et les mesures à la SMP aval

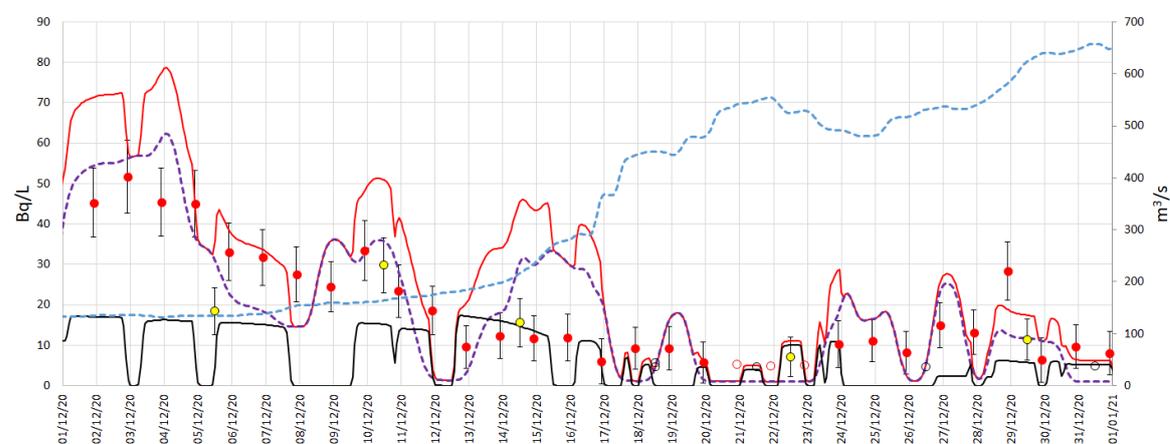
Les résultats des simulations du modèle 1D au niveau de la SMP aval de Chinon sont présentés par mois dans les graphes de la figure ci-dessous. Du fait de l'hypothèse de « bon mélange » utilisée, il s'agit des prévisions de la concentration en tritium à la SMP aval moyennée sur la hauteur et la largeur de la Loire. Ces résultats sont présentés mois par mois de novembre 2020 à avril 2021, en distinguant la concentration totale en tritium dans l'eau attendue au niveau de la SMP aval de Chinon (courbe rouge), la contribution des rejets du CNPE de Chinon (courbe noire) et la contribution cumulée des rejets des CNPE amont – Belleville, Dampierre et Saint Lauren (courbe en pointillé violette). Pour faciliter l'analyse des résultats, la courbe du débit simulé de la Loire au niveau de la SMP aval de Chinon a été ajoutée (courbe en pointillés bleus).

Ces résultats de simulation peuvent être comparés aux mesures disponibles, mesures sur les échantillons aliquotes journaliers (point jaunes) et sur les prélèvements à mi-rejet (points rouges).

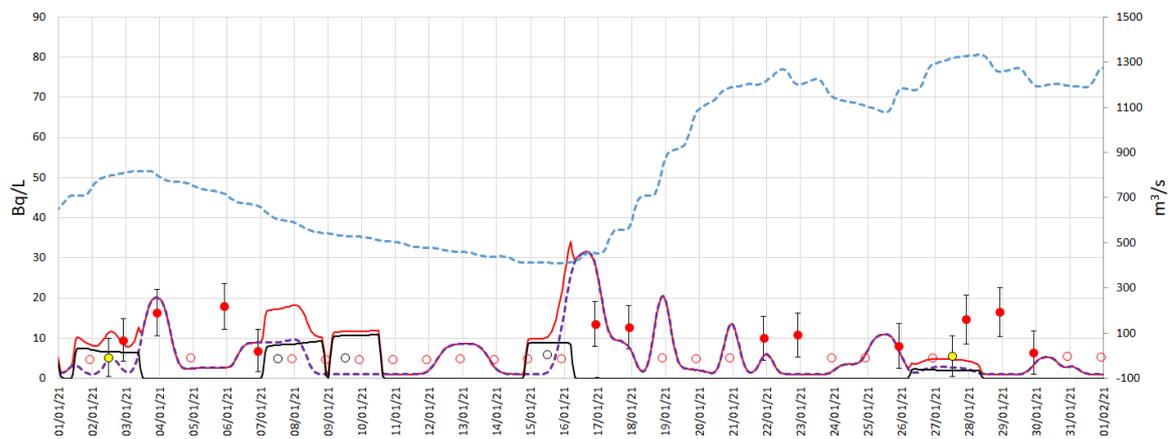
NOVEMBRE 2020



DECEMBRE 2020



JANVIER 2021



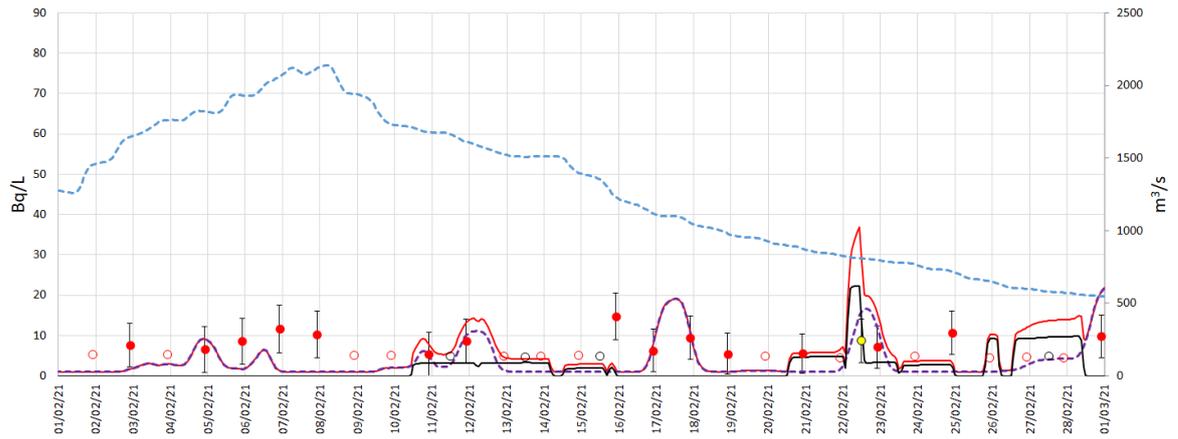
Mesures

- aliquote journalier
- aliquote journalier (seuil de décision)
- mi-rejet
- mi-rejet (seuil de décision)

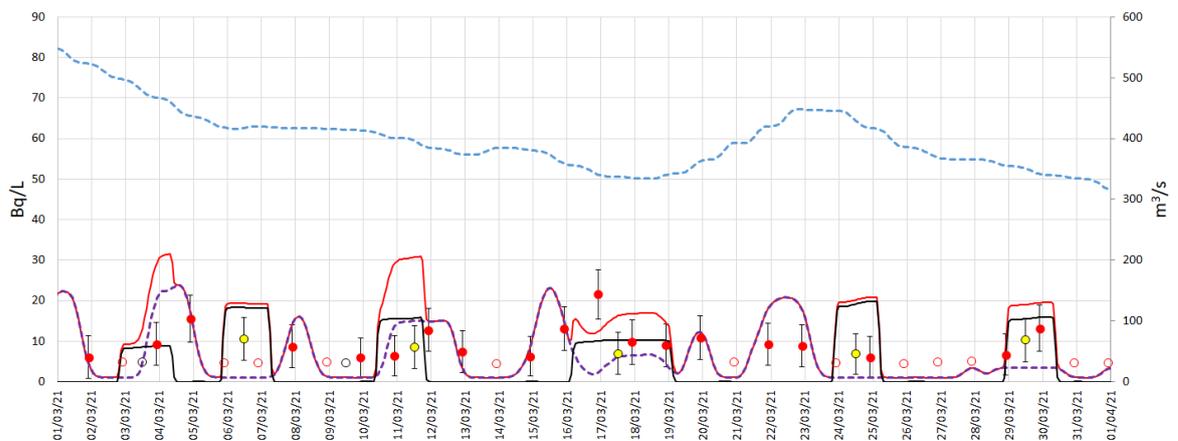
Modélisation SYMBIOSE (bon mélange)

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Contribution Chinon
- - - Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond)
- - - Débit de la Loire

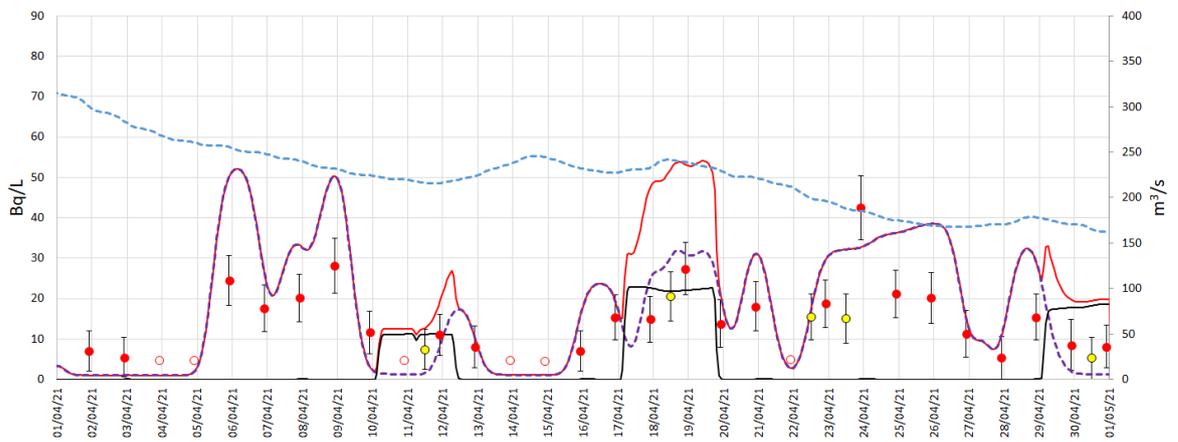
FEVRIER 2021



MARS 2021



AVRIL 2021



Mesures

- aliquote journalier
- aliquote journalier (seuil de décision)
- mi-rejet
- mi-rejet (seuil de décision)

Modélisation SYMBIOSE (bon mélange)

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Contribution Chiron
- Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond)
- Débit de la Loire

Figure 81 : Concentrations en tritium à la SMP aval de Chinon prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE) et mesurée, entre novembre 2020 et avril 2021

Dans l'ensemble, les simulations et les mesures de concentrations en tritium dans l'eau sont du même ordre et évoluent selon les mêmes tendances. L'analyse des résultats conduit à faire les constats suivants :

- le mélange des rejets de Chinon n'est pas complet au niveau de la SMP aval. Lors du passage des rejets de Chinon, les mesures peuvent être proches, inférieures ou supérieures à la prévision de la modélisation supposant leur mélange homogène ;
- les mesures à la SMP aval ne permettent pas toujours de détecter les rejets de Chinon. Lors du passage des rejets de Chinon, les mesures peuvent être bien inférieures aux prévisions de la modélisation (supposant leur mélange complet), proches de la contribution des seuls rejets des CNPE amont.

On note de plus que les mesures à la SMP aval sont parfois inférieures à la contribution attendue des CNPE en amont de Chinon. Les rejets des CNPE en amont de Chinon pourraient n'être pas encore complètement mélangés au niveau de la SMP ou, plus vraisemblablement, les prélèvements de la SMP aval pourraient se faire dans une veine sous influence de l'Indre et du Cher, affluents de la rive gauche de la Loire (à environ 6 et 30 km à l'amont) qui ne seraient pas complètement mélangés à la Loire. Cette hypothèse est confortée par les mesures sur des prélèvements qui ont été effectués par l'IRSN en amont des rejets du CNPE Chinon le 13/01/21.

A cette date, deux prélèvements ont été effectués en rive droite de la Loire en amont des rejets du CNPE de Chinon - l'un au droit du site et l'autre à environ 3 km en amont. Deux prélèvements ont été effectués en rive gauche de la Loire, l'un au niveau du CNPE après la confluence de l'Indre et de la Loire et l'autre sur la Loire, environ 5 km en amont. Enfin, un prélèvement a été effectué sur l'Indre, quelques centaines de mètres en amont de la confluence. Les mesures de concentration de tritium dans l'eau prélevée sont reportées ci-dessous.

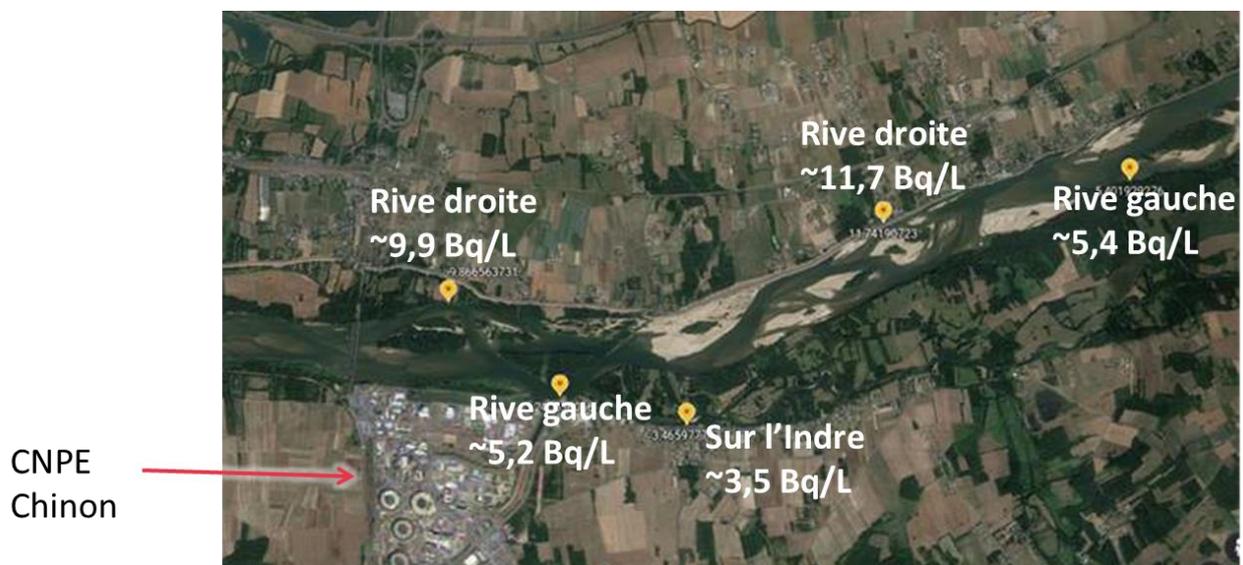


Figure 82 : Concentrations en tritium mesurées sur des prélèvements effectués par l'IRSN en amont des rejets du CNPE de Chinon, le 13/01/21

La concentration en tritium dans la Loire est inhomogène en amont de Chinon : celle en tritium en rive droite est supérieure d'environ un facteur deux à celle en rive gauche. Les rejets des CNPE amont pourraient n'être pas complètement mélangés à ce niveau mais surtout, plus vraisemblablement, les prélèvements en rive gauche de la Loire pourraient avoir été réalisés dans des veines sous influence du Cher, dont les eaux sont a priori au niveau du bruit de fond en tritium. En effet, le Cher afflue en rive gauche, à environ 25 km en amont, et ses eaux ne seraient pas complètement mélangées à la Loire au niveau du CNPE Chinon, restant préférentiellement côté rive gauche.

Les mesures réalisées dans l'Indre sont faibles, de l'ordre de 3,5 Bq/L, mais supérieures à la limite de détection. Ce niveau est vraisemblablement dû à l'apport d'eau de la Loire par un bras de Loire alimentant l'Indre pour le régime hydraulique du 13/01/21 (cf. réunion du Comité de suivi du 28/06/2021). Cet apport d'eau de la Loire s'accompagne d'un apport de tritium rejeté par les CNPE amont, dilué en partie par les eaux de l'Indre.

Comparaison entre la modélisation 2D et les mesures à la SMP aval

Les concentrations à mi-rejet (C_{SMP}) mesurées à la SMP aval du CNPE de Chinon, qui sont publiées dans le RNM dans le cadre de la surveillance entre fin août 2020 et avril 2021, sont comparées :

- aux concentrations de bon mélange théoriques (CBM), qui correspond à la somme des concentrations amont issues des modélisations 1D (incrémentées d'un bruit de fond de 2 Bq/L) et des concentrations de bon mélange des rejets données par les ratios entre les débits de rejet et les débits de la Loire ;
- aux concentrations modélisées avec le modèle 2D au niveau du prélèvement de la SMP (C_{SMP_2D}).

On relèvera deux sources d'incertitude à cet exercice du fait des informations relatives aux concentrations mi-rejet : les heures exactes des prélèvements associés à ces concentrations ne sont pas précisées dans le RNM, et il semblerait que dans le cas de rejets longs et/ou fractionnés, la mesure rapportée à une date donnée dans le RNM puisse avoir été produite à partir de mesures sur plusieurs prélèvements à des dates différentes.

Dans ce contexte et pour cette comparaison, il a été choisi de dater ces concentrations à la moitié de leur rejet de référence et de considérer les concentrations amont modélisées à ces mêmes dates avec un coefficient de Strickler de $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour des débits de la Loire inférieurs à $200 \text{ m}^3/\text{s}$, et de $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour des débits supérieurs. Les concentrations mi-rejet égales à 0 et/ou associées à des débits de rejet inférieurs à 10^5 Bq/s n'ont pas été prises en compte.

Ces données sont présentées dans le tableau suivant, en notant que les deux dernières colonnes correspondent respectivement aux concentrations modélisées avec le modèle 2D au niveau du prélèvement de la SMP (C_{SMP_2D}) et à la valeur ajustée du paramètre de diffusion, cy .

Tableau 32 : Données d'analyse des concentrations mi-rejet à la SMP aval du CNPE de Chinon (fin août 2020 à avril 2021)

							C_{SMP_2D} (Bq/L)	cy (-)
26/08/2020	76	65	2	98,8	26,3	91,3	100,7	0,7
29/08/2020	76	26,7	1,9	72,3	25,0	51,7	68,2	0,7
31/08/2020	77	40	1,2	63,5	15,6	55,6	61,2	0,7
01/09/2020	77	26	1,2	56,3	15,6	41,6	52,0	0,7
06/09/2020	79	35	1,15	51,4	14,6	49,6	54,1	0,7
08/09/2020	77	30	0,9	53	11,7	41,7	49,5	0,7
14/09/2020	74	7	1	44,1	13,5	20,5	29,3	0,7
16/09/2020	72	33	1	53	13,9	46,9	53,5	0,7
20/09/2020	67	56	3,5	148	52,2	108,2	141,0	0,7
26/09/2020	69	43	1,1	48	15,9	58,9	64,0	0,7
01/10/2020	97	15	1,2	31,1	12,4	27,4	33,0	0,7
06/10/2020	147	20	1,5	33,3	10,2	30,2	35,5	0,7
10/10/2020	265	10	2,3	9,1	8,7	18,7	2,5	0,4
15/10/2020	204	2	2,1	8,4	10,3	12,3	2,2	0,7
21/10/2020	176	5	1	9,6	5,7	10,7	5,2	0,4
25/10/2020	224	14,8	3,8	14,6	17,0	31,8	15,0	0,4
28/10/2020	213	10,2	3,6	9,6	16,9	27,1	10,3	0,4
31/10/2020	188	2	3,1	9,7	16,5	18,5	2,0	0,4
04/11/2020	205	2	3,3	17,4	16,1	18,1	2,1	0,4
13/11/2020	172	14	1,4	14,3	8,1	20,1	12,0	0,4
26/11/2020	144	50	2,2	51,8	15,3	65,3	50,3	0,4
30/11/2020	135	17	1,5	28	11,1	28,1	17,0	0,4
10/12/2020	161	35	2,5	29,8	15,5	50,5	35,0	0,4

							C_{SMP_2D} (Bq/L)	$c\gamma$ (-)
14/12/2020	199	18	3,15	15,6	15,8	33,8	18,1	0,4
22/12/2020	524	2	5,3	7,1	10,1	12,1	2,3	0,4
29/12/2020	573	13	3,6	11,4	6,3	19,3	13,3	0,4
02/01/2021	707	4	5,2	5,2	7,4	11,4	4,4	0,4
27/01/2021	1203	3,8	2,6	5,5	2,2	6,0	4,8	0,7
22/02/2021	810	11	18	8,7	22,2	33,2	12,6	0,4
06/03/2021	416	2	7,6	10,6	18,3	20,3	2,4	0,4
11/03/2021	388	12	6,2	8,5	16,0	28,0	12,0	0,4
17/03/2021	337	7	3,4	7	10,1	17,1	7,2	0,4
24/03/2021	420	2	8,3	6,8	19,8	21,8	2,4	0,4
29/03/2021	350	4,5	5,4	10,3	15,4	19,9	4,7	0,4
11/04/2021	216	6	2,5	7,4	11,6	17,6	6,0	0,4
18/04/2021	232	27	5,3	20,5	22,8	49,8	27,0	0,4
30/04/2021	171	3,7	3	5,22	17,5	21,2	3,7	0,4

Pour interpréter ce tableau, la figure suivante présente les variations en fonction du débit de la Loire du ratio C_{SMP} / CBM .

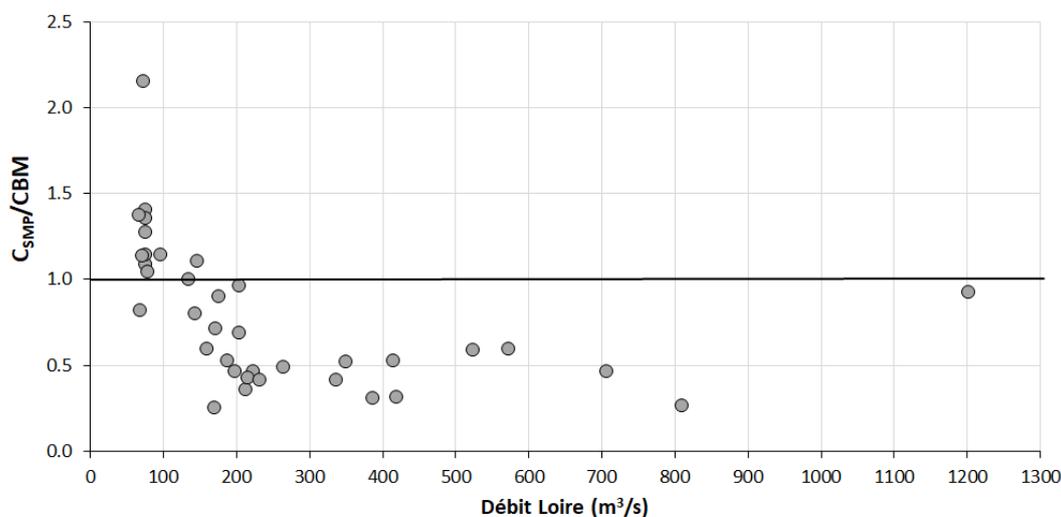


Figure 83 : Variations du rapport C_{SMP}/CBM en fonction du débit de la Loire entre fin aout 2020 et avril 2021

Cette figure confirme les résultats préliminaires, à savoir que les mesures mi-rejet à la SMP permettent de détecter de façon satisfaisante les rejets du CNPE de Chinon lorsque le débit de la Loire est inférieur à environ $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ($C_{SMP}/CBM > 1$). Au-delà de ces débits, les ratios C_{SMP}/CBM oscillent entre 0,8 et 0,2 au gré des contributions des concentrations amont et des rejets, et témoignent d'une représentativité très limitée des mesures de la SMP vis-à-vis des rejets de Chinon.

On notera que la mesure effectuée au débit de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ suggère que le rapport ré-augmente aux forts débits, ce qui pourrait améliorer la représentativité des mesures à la SMP et resterait à confirmer.

En complément, la figure ci-dessous montre que les modélisations 2D de la concentration à la SMP (C_{SMP_2D}) présentent une corrélation correcte avec les mesures mi-rejet (C_{SMP}).

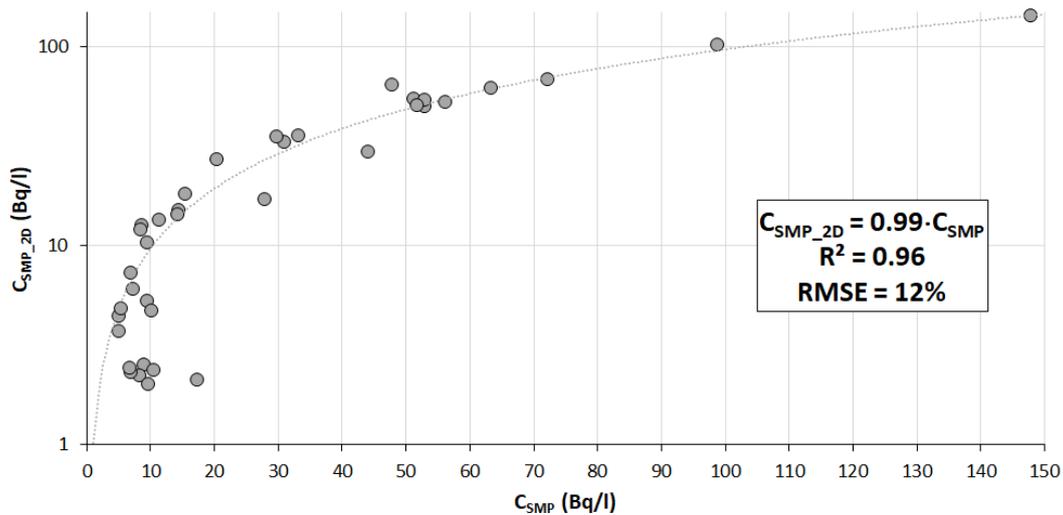


Figure 84 : Corrélation entre les mesures mi-rejet et les modélisations 2D à la SMP aval du CNPE de Chinon entre fin août 2020 et avril 2021

La comparaison entre C_{SMP} et C_{SMP_2D} aboutit à un coefficient de détermination de 0,96 pour un coefficient directeur de 0,99 et une erreur moyenne de 12%. Les concentrations mesurées à la SMP aval peuvent être interprétées au regard des rejets du CNPE de Chinon par les résultats de la modélisation 2D qui utilise les concentrations en amont du CNPE. En effet, la représentativité de la SMP aval vis-à-vis des rejets de Chinon est limitée par le positionnement du point de prélèvement situé à 5 m de la rive gauche, ce qui le place plus ou moins en bordure gauche des panaches en fonction du débit de la Loire, qui conditionne la largeur moyenne de l'écoulement (voir figure ci-dessous) et, par répercussion, la distance de mélange.



Figure 85 : Vues aériennes du lit de la Loire à la SMP à fort et faible débits

Pour illustrer ce comportement et affiner l'interprétation des mesures à la SMP aval du CNPE de Chinon, la figure suivante présente quelques exemples de modélisations 2D au transect de la SMP pour des débits variant de 67 à 1200 m³/s.

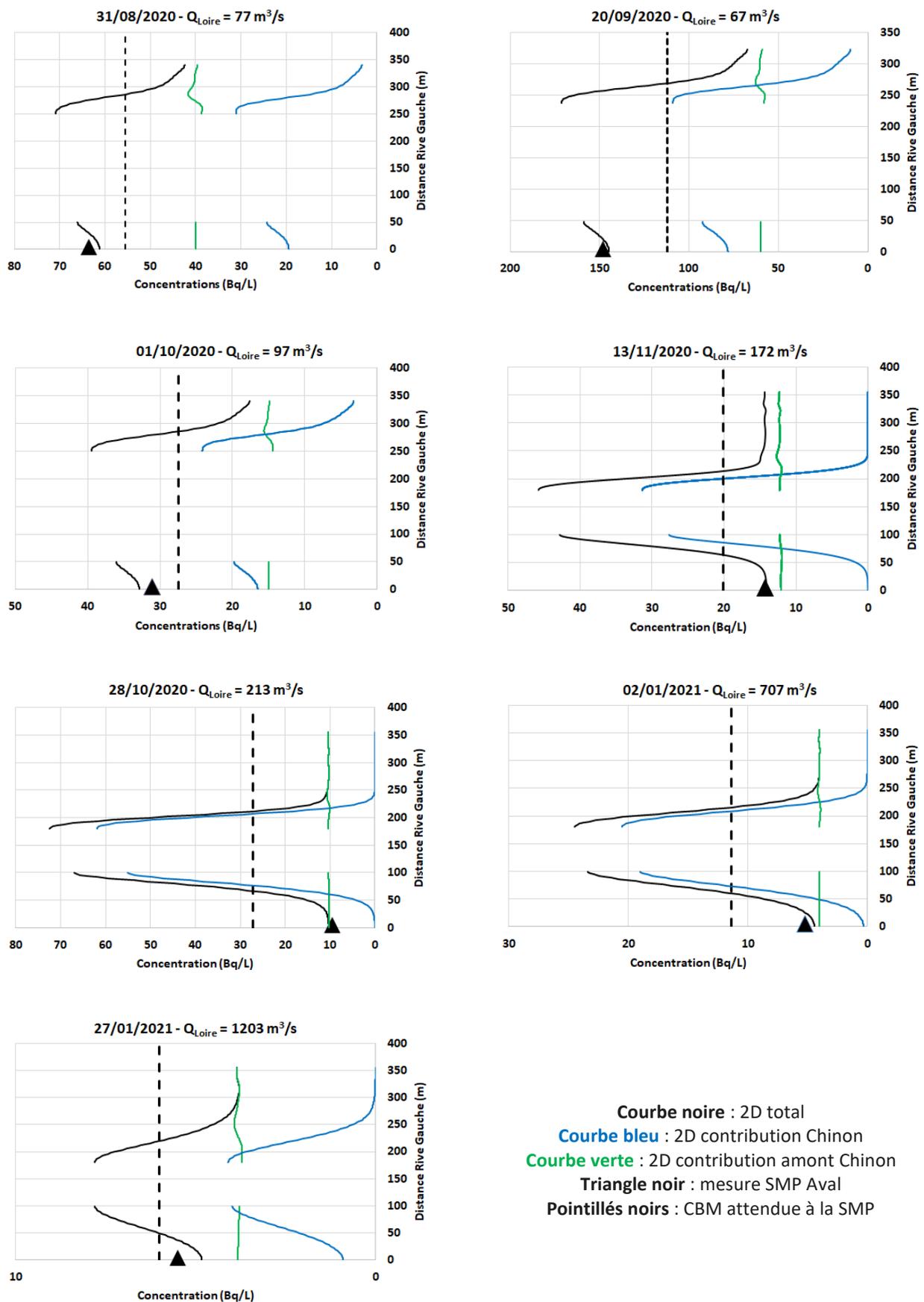


Figure 86 : Exemples de modélisations 2D au transect de la SMP pour des débits variant de 67 à 1200 m³/s.

Quelles que soient les conditions de débits, ces figures confirment que les panaches des rejets de Chinon ne sont pas homogénéisées au niveau de la SMP aval et que leurs pics passent par le bras opposé à celui des prélèvements situés dans le bord gauche des panaches.

Pour des débits inférieurs à 100 m³/s, les mesures mi-rejet à la SMP sont représentatives des rejets du CNPE car elles sont supérieures aux CBM attendues et clairement démarquées des concentrations amont. Lorsque le débit augmente, l'écoulement s'élargit et le bord gauche des panaches au niveau de la SMP devient de moins en moins marqué par les rejets. Les mesures à la SMP deviennent alors essentiellement représentatives des conditions amont et ne détectent pas ou très peu les rejets du CNPE.

Aux forts débits (> 1000 m³/s) (cas du 27/01/2021), les prélèvements à la SMP aval sont à nouveau sous influence des rejets du CNPE de Chinon, ce qui pourrait s'expliquer par deux phénomènes :

1. le fait qu'une partie des rejets du CNPE s'effectue en berge et non par la clarinette (hypothèse à confirmer par EDF et non appliquée dans les modélisations 2D) ;
2. l'augmentation de la diffusion latérale et le ralentissement de l'élargissement de l'écoulement quand le débit augmente dans cette gamme. Cependant, le modèle 2D n'ayant pas été calé pour ces conditions de débit, ce résultat, bien qu'attendu théoriquement, mériterait d'être confirmé par des mesures complémentaires.

CONCLUSIONS SUR LA REPRESENTATIVITE DES PRELEVEMENTS A LA SMP AVAL

Compte tenu du positionnement du point de prélèvement, situé à 5 m de la rive gauche, qui le place plus ou moins en bordure gauche des panaches en fonction du débit de la Loire, les prélèvements à la SMP aval peuvent être représentatifs ou non des rejets du CNPE de Chinon :

- pour des débits inférieurs à 100 m³/s, les mesures mi-rejet à la SMP sont représentatives des rejets du CNPE de Chinon ;
- pour des débits supérieurs, les mesures à la SMP deviennent essentiellement représentatives des conditions amont et ne détectent pas ou très peu les rejets du CNPE.

APPLICATION A LA MESURE AU PONT CESSART EN JANVIER 2019

Les travaux de modélisation du transfert du tritium rejeté par les CNPE du bassin versant de la Loire ont été étendus à la période de janvier 2019 selon la même méthodologie, sur la base des rejets déclarés des débits de la Loire et de la Vienne concernés.

5.1 MODELISATION 1D

Les résultats obtenus par la modélisation 1D en supposant que les eaux de la Loire et de la Vienne sont mélangées de façon homogène au niveau de Saumur sont représentés ci-dessous. La concentration totale en tritium dans l'eau attendue le 21 janvier 2019 est de l'ordre de 50 Bq/L, six fois inférieure à la mesure atypique de 310 Bq/L ; elle est due aux contributions des rejets des CNPE de Chinon, de Belleville et, dans une moindre mesure, de Civaux.

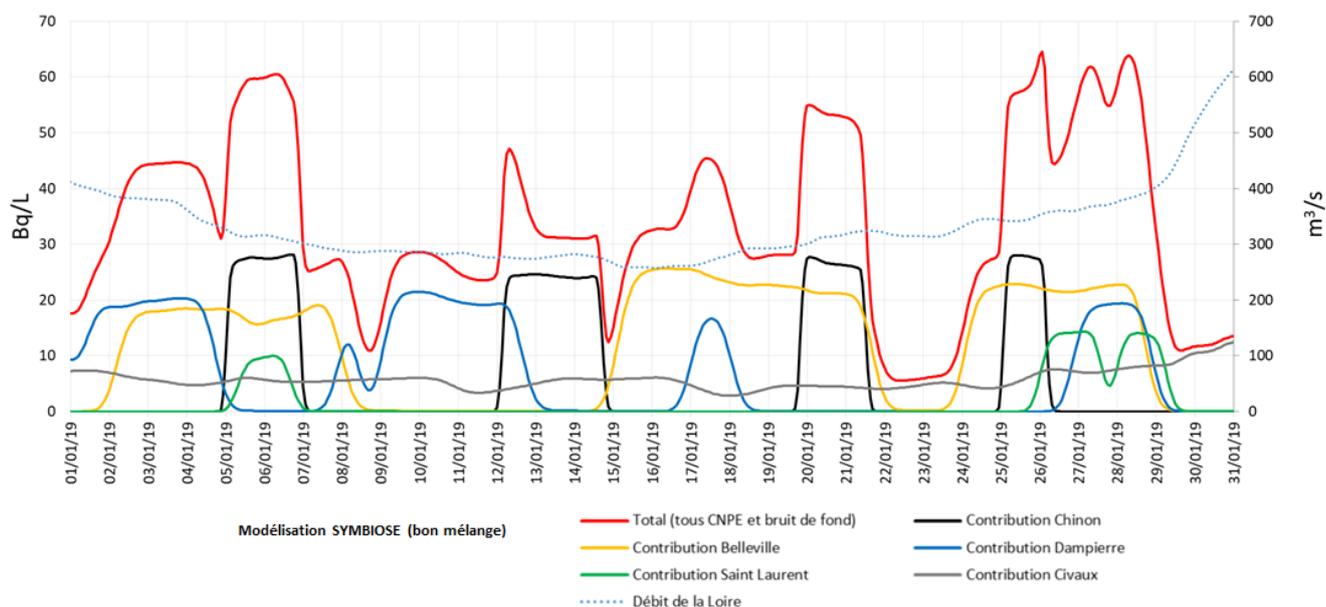


Figure 87 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE), en supposant que les eaux de la Loire et de la Vienne sont mélangées, en janvier 2019

Les résultats obtenus par la modélisation 1D en supposant que les eaux de la Loire et de la Vienne ne sont pas mélangées au niveau de Saumur sont représentés dans la figure suivante :

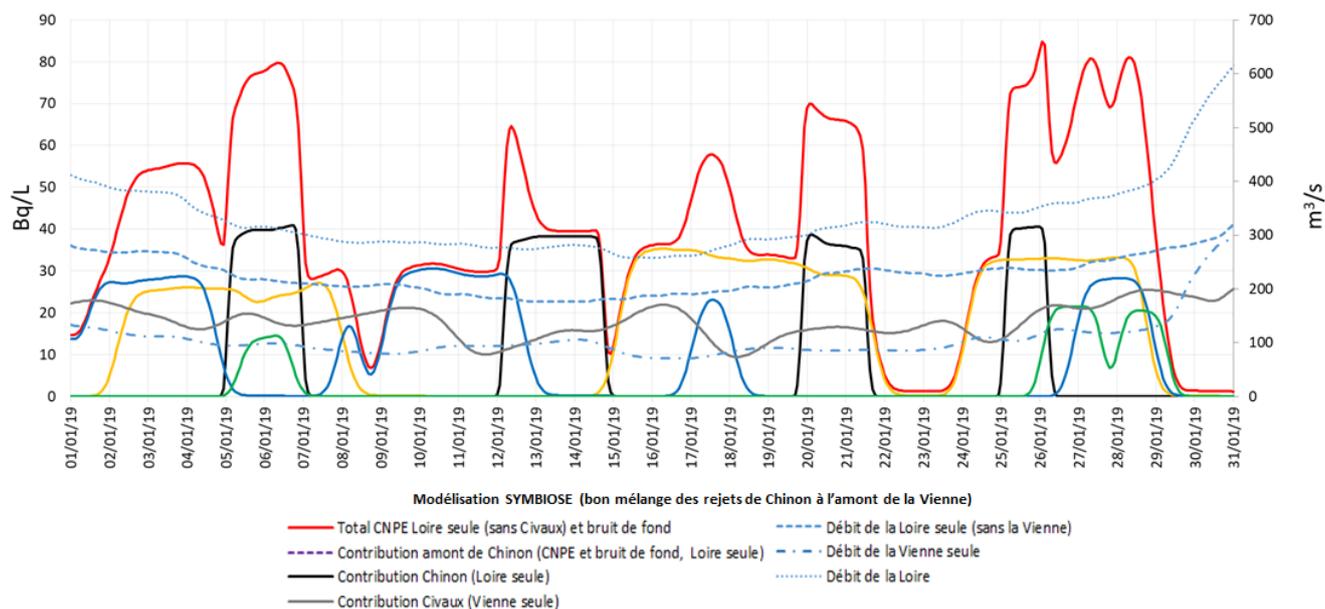


Figure 88: Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE), en supposant que les eaux de la Loire et de la Vienne ne sont pas mélangées, et concentration mesurée, en janvier 2019

Selon les enseignements tirés de la comparaison modèle-mesure pendant la campagne de mesures, le débit autour du 21 janvier 2019 étant d'environ 300 m³/s, et le débit de la Vienne apportant une contribution modeste au débit total de la Loire à Saumur (environ un quart), il est raisonnable de penser que les eaux de la Loire et de la Vienne sont alors faiblement mélangées au niveau de Saumur, et que le milieu du pont Cessart voit plutôt passer les rejets des CNPE de la Loire, sans les apports de Civaux et sans dilution par les eaux de la Vienne. La mesure atypique de 310 Bq/L ayant été faite sur un prélèvement au milieu du pont Cessart le 21 janvier 2019, elle est alors à comparer à la concentration attendue du fait des rejets des CNPE de la Loire par la modélisation 1D sans mélange des eaux de la Loire et de la Vienne. Cette concentration attendue est d'environ 70 Bq/L, due aux rejets de Chinon et de Belleville. La prévision du modèle 1D dans cette situation est encore entre 4 et 5 fois inférieure à la mesure.

APPLICATION DE LA MODELISATION 1D A LA MESURE DU 21 JANVIER 2019

La concentration estimée le 21 janvier 2019 au pont Cessart par la modélisation 1D est au plus de 70 Bq/L, en lien avec les rejets de Chinon et de Belleville.

Dans ce calcul 1D, les rejets de Chinon et des CNPE amont de la Loire sont supposés être bien mélangés dans la masse d'eau issue de la Loire avant la confluence avec la Vienne. Pour pousser l'analyse plus loin sur la concentration attendue au milieu du pont Cessart sans poser cette hypothèse, il est nécessaire de recourir à la modélisation 2D

5.2 MODELISATION 2D

Paramétrage hydrographique

Le domaine est modélisé à partir de la calibration du traçage EDF du 24 juin 2020 (voir annexe 10.4) qui couvre la Loire depuis le CNPE de Chinon jusqu'au pont Cessart à Saumur. Néanmoins, il faut considérer que le débit de la Loire modélisé à Saumur le 21 janvier 2019 ($\approx 300 \text{ m}^3/\text{s}$) se situe entre les débits recalculés à Saumur à partir de ceux présentés dans les études de traçage EDF du 25 octobre 2017 ($133 \text{ m}^3/\text{s}$), du 27 mars 2019 ($482 \text{ m}^3/\text{s}$) et du 24 juin 2020 ($403 \text{ m}^3/\text{s}$). Le principal facteur d'incertitude pour l'application du modèle 2D au 21 janvier 2019 est alors le paramètre de diffusion cy (voir annexe 10.3) qui a été calibré à 0,7 pour le traçage du 25 octobre 2017 et à 0,2 pour les traçages du 27 mars 2019 et du 24 juin 2020. Pour couvrir cette incertitude, les calculs sont donc réalisés avec ces deux valeurs en considérant que les modélisations à $cy = 0,2$ et $cy = 0,7$ correspondent respectivement à des estimations hautes et basses des pics de concentration dans l'axe du panache.

Paramétrage des débits

Les débits de la Loire amont ($Q_{\text{LoireAmont}}$) et de la Vienne (Q_{Vienne}) avant leur confluence sont déduits des modélisations 1D réalisées lors de l'étude initiale avec le code CASTEAUR.

Tableau 33 : Débits de la Loire amont et de la Vienne pour la modélisation du 21/01/2019

Date	$Q_{\text{LoireAmont}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{\text{Vienne}} \text{ (m}^3/\text{s)}$
21/01/2019	225	75

Paramétrage des sources de tritium

La concentration en tritium de la Loire à l'amont du CNPE de Chinon ($C_{\text{LoireAmont}} - \text{Bq/l}$) et dans la Vienne à l'amont de sa confluence avec la Loire ($C_{\text{Vienne}} - \text{Bq/l}$) sont déterminées à partir des mêmes modélisations 1D que les débits.

Le débit de rejet aux buses de la clarinette du CNPE de Chinon est associé au rejet déclaré par ce CNPE entre le 19 et le 21 janvier 2019 (cf. registre EDF déclaré à ASN) pour lequel les premières expertises de l'IRSN ont identifié la présence du panache au pont Cessart au moment du prélèvement de la mesure atypique. Comme pour les modélisations précédentes, il est supposé que ce rejet était uniformément réparti entre les 11 buses de la clarinette, ce qui revient à associer à chaque buse son débit de rejet divisé par 11. Le tableau suivant indique ces différents paramètres.

Tableau 34 : Concentrations en tritium de la Loire et de la Vienne et débit de rejet aux buses pour la modélisation du 21/01/2019

Date	$C_{\text{LoireAmont}} \text{ (Bq/L)}$	$C_{\text{Vienne}} \text{ (Bq/L)}$	$q_{\text{Rejet}} \text{ (Bq/s)}$
21/01/2019	20	5	$0,75 \cdot 10^6$

Résultats

Les résultats du modèle 2D sont présentés sur la Figure 89 aux transects de différents lieux situés à l'aval immédiat du rejet, à la SMP aval, à l'amont du pont de Montsoreau, et au pont Cessart à Saumur.

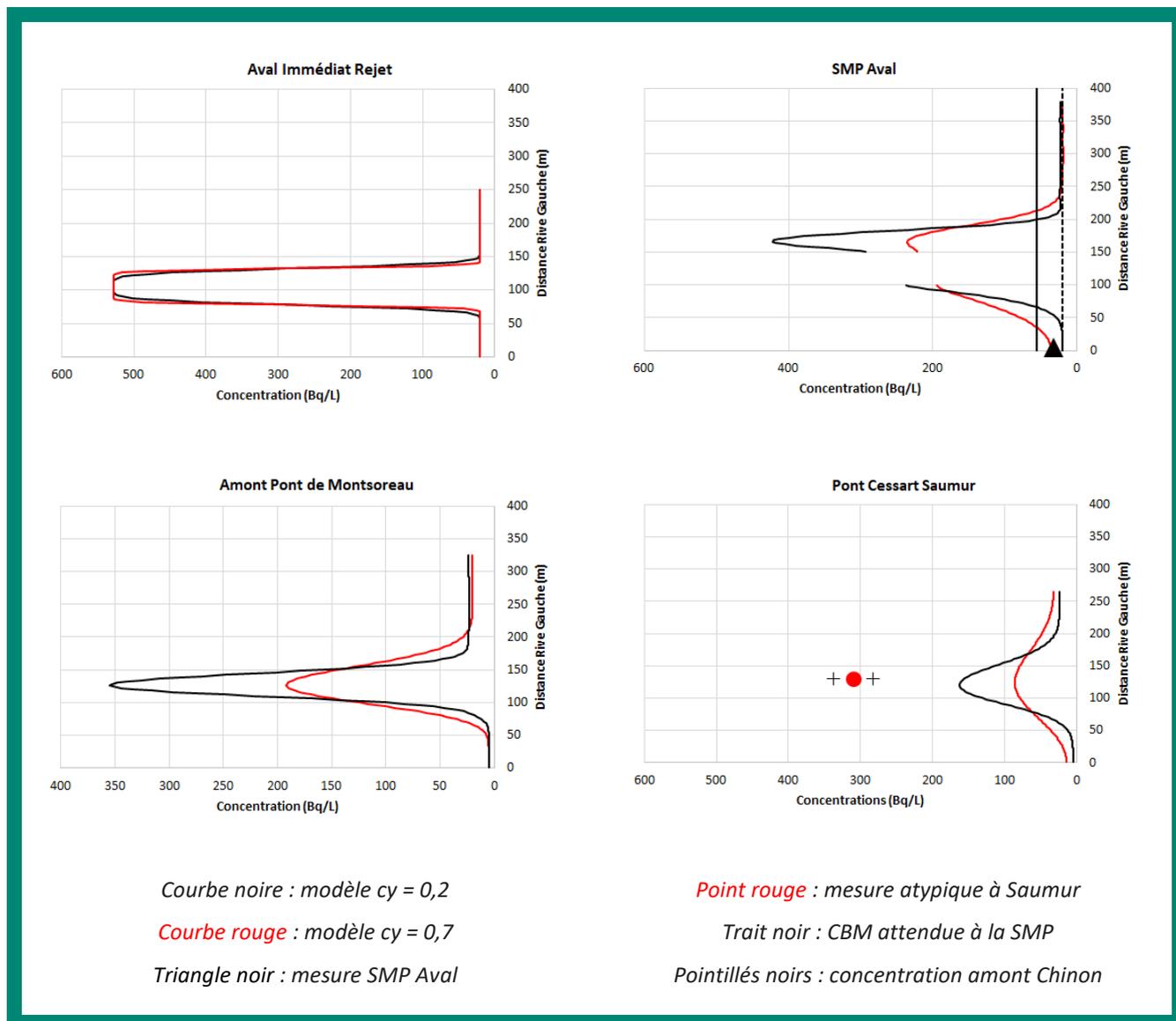


Figure 89 : Modélisation 2D des concentrations à l'aval du CNPE de Chinon le 21/01/2019

Les résultats à l'aval immédiat du rejet suggèrent que des niveaux de quelques centaines de Bq/L ont pu se maintenir dans l'axe du panache jusqu'au pont de Montsoreau.

A Saumur, les pics de concentrations obtenus avec $cy = 0,2$ et $cy = 0,7$ sont respectivement inférieurs d'un facteur 2 et d'un facteur 4 à la mesure atypique.

A la SMP aval, les valeurs modélisées en rive gauche sont en accord avec la concentration donnée par la surveillance. Dans les deux cas, le panache du rejet de Chinon est essentiellement localisé dans le bras opposé à celui de la station ce qui ne lui permet pas d'être correctement détecté par la SMP qui indique une concentration comprise entre la concentration théorique de bon mélange (trait noir) et la valeur à l'amont du CNPE (pointillés noirs).

APPLICATION DE LA MODELISATION 2D A LA MESURE DU 21 JANVIER 2019

Au niveau du pont Cessart à Saumur, considérant les rejets déclarés par l'exploitant conformément à la réglementation, la modélisation 2D conduit à une concentration maximale en tritium dans la Loire le 21 janvier 2019 variant entre 80 Bq/L et environ 160 Bq/L suivant les hypothèses prises pour le paramétrage hydrographique.

Ces modélisations ne permettent pas, même dans des conditions majorantes, de retrouver le niveau de la mesure atypique à 310 Bq/L, même si le maximum de la concentration en tritium est bien localisé au centre du pont.

5.3 HYPOTHESE D'UN MAUVAIS FONCTIONNEMENT DE LA CLARINETTE DE REJET

A l'occasion des différentes réunions du Comité de suivi, plusieurs interrogations ont porté sur les conséquences d'un éventuel dysfonctionnement de l'ouvrage de rejet du CNPE de Chinon (clarinette) sur la dispersion aval de ses effluents. Pour apporter des éléments de réponse, le modèle 2D est utilisé afin de comparer la situation nominale d'un rejet uniformément réparti entre les 11 buses et trois situations extrêmes caractérisées par le seul fonctionnement de la première buse, de la buse centrale et de la dernière buse. Pour être représentatif des estimations maximales des pics de concentration, ces calculs sont réalisés avec le paramètre de diffusion cy fixé à 0,2. La figure ci-dessous présente la comparaison de ces quatre scénarios appliqués au cas du rejet ayant eu lieu entre le 19 et le 21 janvier 2019.

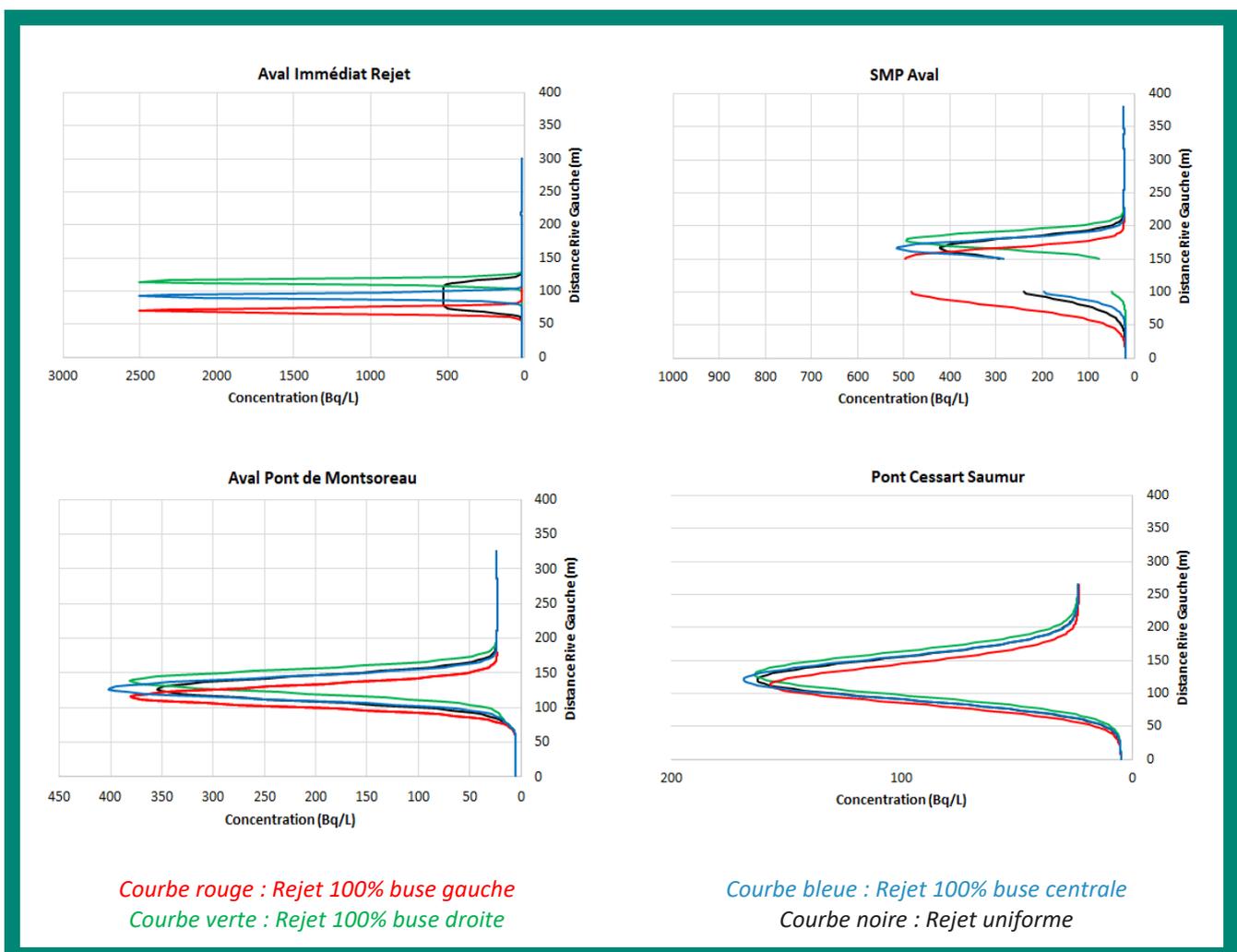


Figure 90 : Profils de concentrations en différents points et pour différentes configurations des buses de la clarinette de rejet appliqué au rejet qui s'est déroulé entre le 19 et le 21 janvier 2019

Avec l'hypothèse d'homogénéité verticale des concentrations, ces résultats suggèrent qu'une réduction du nombre de buses fonctionnelles aurait pour conséquence d'augmenter les concentrations dans l'axe du panache dans le champ proche de la clarinette. Néanmoins, lors de la présentation de ces résultats à l'occasion de la quatrième réunion du Comité de suivi, les représentants d'EDF ont précisé que l'obstruction d'une buse de rejet s'accompagnerait de pertes de charge et, par conséquent, d'une diminution du débit de rejet. Ce phénomène n'ayant pas été pris en compte ici, on peut considérer que les augmentations locales des concentrations seraient, dans la réalité, inférieures à celles données par ces calculs.

Au niveau de la SMP aval, c'est essentiellement le positionnement du pic qui serait impacté par les différents scénarios. Celui-ci serait d'autant plus près de la rive gauche et sa concentration d'autant plus élevée que la buse de rejet fonctionnelle serait proche de cette même rive.

À partir du pont de Montsoreau et jusqu'à Saumur les distributions latérales des concentrations deviennent similaires pour tous les scénarios, ce qui tend à éliminer l'hypothèse d'un dysfonctionnement de la clarinette pour expliquer la mesure atypique du 21 janvier 2019.

CONCLUSION SUR L'HYPOTHESE D'UN MAUVAIS FONCTIONNEMENT DE LA CLARINETTE

Si l'état de la clarinette impacte les concentrations en tritium dans les eaux de la Loire dans le champ proche du rejet et le positionnement du panache à la SMP aval, il n'a que très peu d'effet à l'aval de la confluence avec la Vienne et en particulier à Saumur et n'explique pas la mesure atypique à 310 Bq/L faite à Saumur.

5.4 HYPOTHESE D'UNE ERREUR DE REJET

Début septembre 2020, EDF a déclaré un évènement significatif relatif à la non-maîtrise d'un rejet d'effluents liquide résultant d'une erreur de mesure ayant conduit à une sous-estimation d'un facteur 4 de la concentration de l'effluent rejeté par le CNPE de Chinon (voir chapitre 6.1). Compte tenu des conditions de débit ce jour-là ($< 100 \text{ m}^3/\text{s}$), ce rejet non-maîtrisé a pu être détecté par la surveillance à la SMP aval.

Cet évènement a conduit les membres du Comité de suivi à demander à l'IRSN de modéliser une erreur similaire sur le rejet opéré entre le 19 et le 21 janvier 2019. En miroir du rejet non maîtrisé de septembre 2020, cette modélisation applique une concentration 4 fois supérieure à celle rapportée dans le registre de rejet du CNPE de Chinon de janvier 2019 pour l'effluent n°10 rejeté du 19/01/19 à 11 h jusqu'au 21/01/19 à 4 h et identifié comme présent à Saumur le 21/01/19 par la modélisation 1D. Il a été pris également comme hypothèse que le débit de rejet est constant pendant toute la durée du rejet et égal au débit moyen déclaré par EDF dans ses registres de rejets.

Avec cette hypothèse d'une erreur d'un facteur 4, la concentration en tritium de l'effluent rejeté serait de $14,4 \text{ MBq/L}^{20}$ au lieu des $3,6 \text{ MBq/L}$ déclarés.

²⁰ $1 \text{ MBq/L} = 10^6 \text{ Bq/L}$.

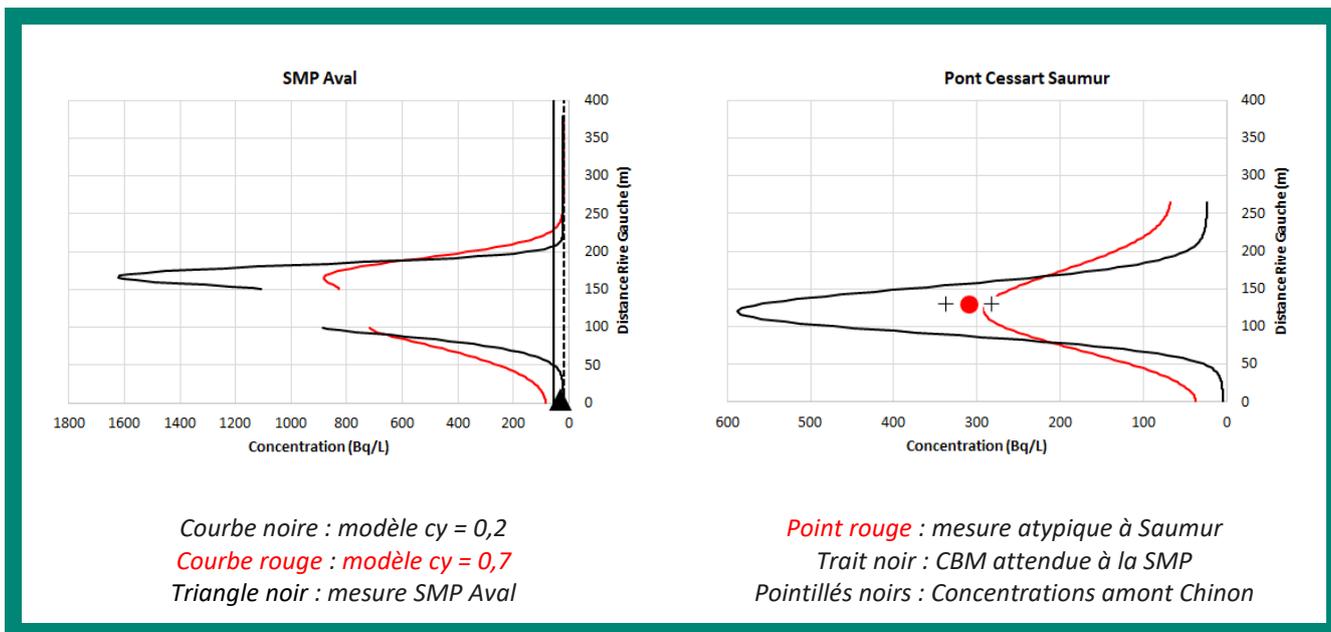


Figure 91 : Modélisation 2D des concentrations à Saumur le 21/01/2019 pour une concentration de rejet supposée quatre fois supérieure à la valeur déclarée

Ces modélisations 2D montrent que la concentration en tritium dans l'axe du panache atteindrait dès lors à Saumur des niveaux équivalents ou supérieurs à la valeur atypique de 310 Bq/L – et ce quel que soit le paramétrage hydraulique du modèle.

Il convient par ailleurs de souligner que, le 21 janvier 2019, les conditions de débits de la Loire (largement supérieurs à 100 m³/s à la SMP aval du CNPE de Chinon) n'auraient très certainement pas permis de détecter un hypothétique événement similaire, comme le montre la figure précédente à la SMP aval.

Pour évaluer le réalisme d'une concentration en tritium théorique de 14,4 MBq/L dans un effluent du CNPE de Chinon, il convient de la mettre en perspective des concentrations déclarées dans les registres de rejets de Chinon entre janvier 2018 et avril 2021. Sur cette période, les concentrations déclarées varient entre un minimum de 129 Bq/L et un maximum de 4 MBq/L, avec une valeur moyenne de 1,3 MBq/L, une valeur médiane de 1,2 MBq/L et un écart type de 0,75 MBq/L (voir figure ci-dessous).

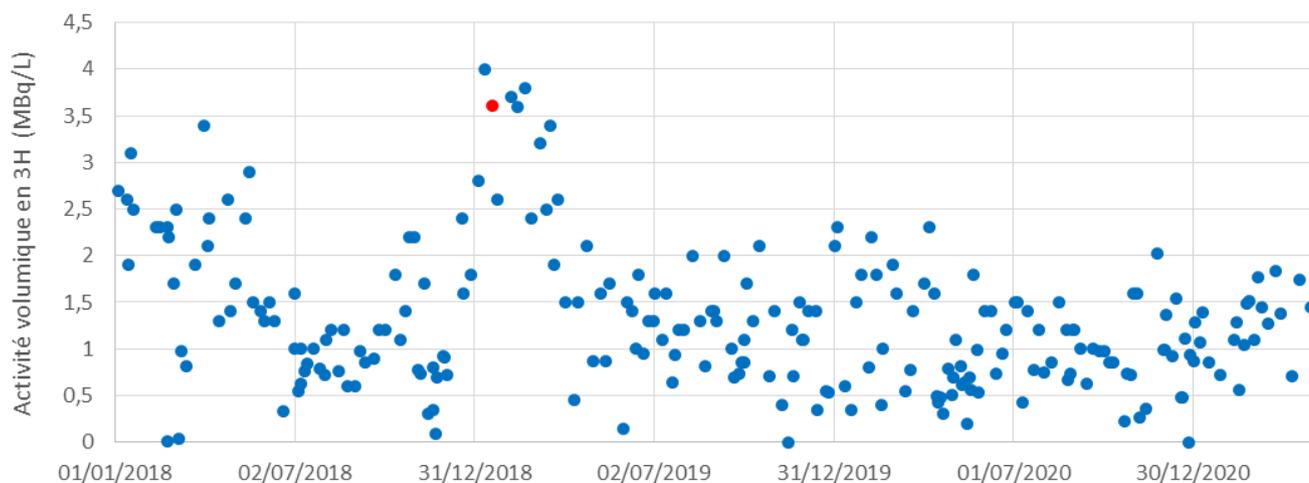


Figure 92 : Concentrations en tritium des effluents sortant de la station de traitement des effluents et rejetés par le CNPE Chinon, de janvier 2018 à avril 2021. Le point rouge identifie l'activité volumique en tritium déclarée de l'effluent rejeté du 19 au 21/01/2019 et passant à Saumur le 21/01/2019

Pour compléter cette mise en perspective, les concentrations minimales et maximales déclarées sur la période de janvier 2018 à avril 2021 pour les effluents liquides de tous les CNPE du bassin versant de la Loire sont fournies ci-dessous :

Tableau 35 : Concentrations minimales et maximales en tritium dans les rejets déclarés sur la période janvier 2018 – avril 2021

CNPE	Réacteurs	Minimum (Bq/L)	Maximum (Bq/L)
Belleville	2 x 1300 MWe	1900	5,6.10 ⁶
Dampierre	4 x 900 MWe	480	3,4.10 ⁶
Saint-Laurent	2 x 900 MWe	53	4,2.10 ⁶
Chinon	4 x 900 MWe	129	4.10 ⁶
Civaux	2 x 1450 MWe	520	9,9.10 ⁶

Au regard de ces valeurs, la concentration de 3,6 MBq/L déclarée pour l'effluent rejeté par le CNPE de Chinon du 19 au 21/01/2019 fait donc partie des concentrations les plus fortes mesurées à ce CNPE sur ces trois années. Sur cette période, elle se trouve au 98^{ème} percentile et seuls 3 effluents rejetés ont eu une concentration supérieure.

Pour ce qui concerne l'hypothèse d'une concentration de 14,4 MBq/L, il apparaît qu'une telle valeur sortirait très largement de la gamme habituelle et relèverait d'une situation exceptionnelle par rapport aux concentrations rapportées de janvier 2018 à avril 2021 pour l'ensemble des CNPE du bassin versant de la Loire. Cette hypothèse semble donc peu plausible compte tenu :

- des conditions qui auraient pu conduire à une concentration dépassant de façon très significative les niveaux des effluents des registres de rejets entre janvier 2018 et avril 2021 ;
- des vérifications effectuées par l'ASN (inspection du 21 juin 2019).

Dans l'hypothèse d'une erreur d'un facteur 2 (rejet d'un effluent de concentration en tritium de 7,2 MBq/L) sur la concentration de l'effluent rejeté, la modélisation montre que la concentration atypique de 310 Bq/L peut-être également approchée pour un facteur $cy = 0,2$.

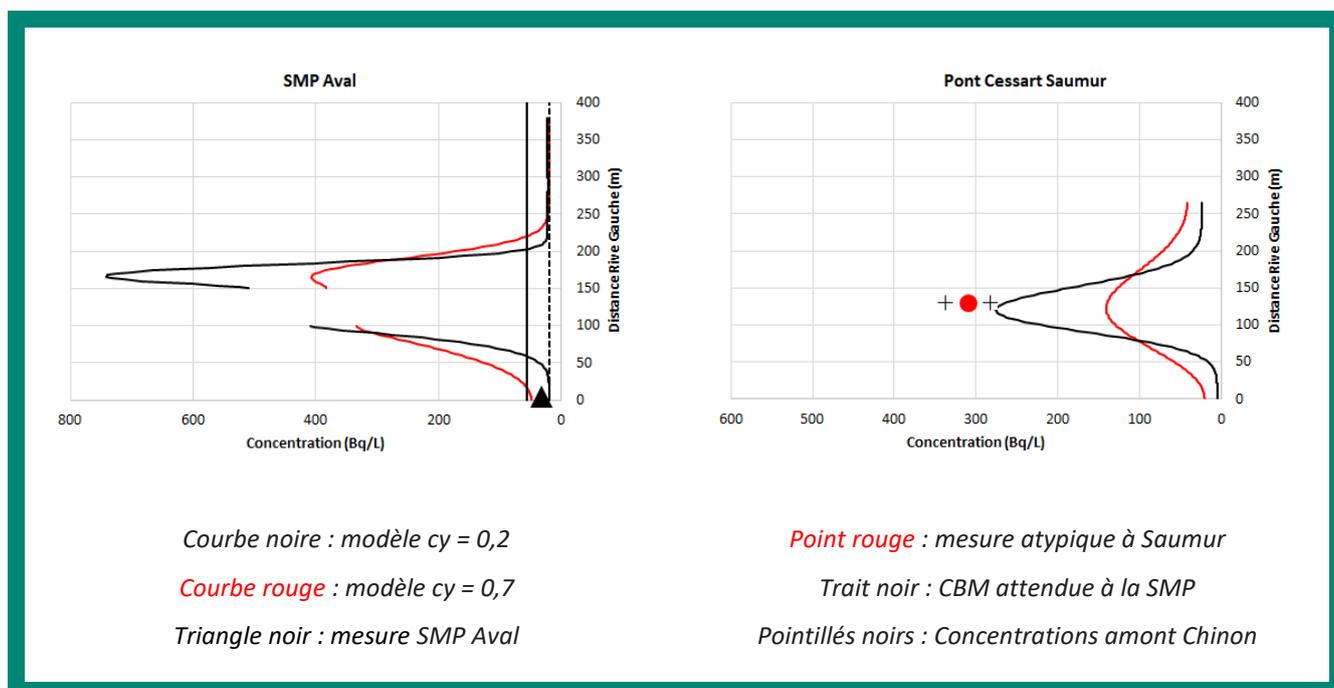


Figure 93 : Modélisation 2D des concentrations à Saumur le 21/01/2019 pour une concentration de rejet supposée 2 fois supérieure à la valeur déclarée

Une telle concentration en tritium de l'effluent rejeté reste cependant clairement bien au-dessus de la gamme des concentrations déclarées par le CNPE de Chinon sur la période de janvier 2018 à avril 2021.

CONCLUSIONS SUR L'HYPOTHESE D'UNE ERREUR DE REJET

Les modélisations montrent que, dans le cas d'un rejet ayant une concentration en tritium 4 fois supérieure à celle rapportée dans le registre de rejet du CNPE de Chinon de janvier 2019, la concentration en tritium dans l'axe du panache atteindrait dès lors à Saumur des niveaux équivalents ou supérieurs à la valeur atypique de 310 Bq/L.

Cette hypothèse semble cependant peu plausible compte tenu de la concentration induite dans l'effluent, qui dépasserait de façon très significative les niveaux des effluents des registres de rejets entre janvier 2018 et avril 2021 pour le CNPE de Chinon.

Néanmoins, ces modélisations montrent également qu'une erreur dans le processus de maîtrise des rejets (concentration, débit...) pourrait entraîner une concentration en tritium en aval du CNPE très supérieure aux prévisions de l'exploitant sans pour autant être systématiquement détectée par les analyses des prélèvements à la SMP aval.

MODELISATION COMPLEMENTAIRE APPLIQUEE À L'ÉVENEMENT DE SEPTEMBRE 2020

Avant que la campagne IRSN ne commence, EDF a déclaré un incident pour le rejet liquide effectué en Loire par le CNPE de Chinon entre le 19 septembre 2020 à 17 h 20 et le 21 septembre 2020 à 7 h (EDF, 2020). Cet incident, consécutif à une analyse erronée de la concentration en tritium de la bache 0 KER 003 BA, s'est traduit par une sous-estimation des quantités rejetées et, tous CNPE confondus, par une concentration ajoutée en Loire supérieure à 100 Bq/L et au dépassement de la limite de 140 Bq/L prévue à l'article 3.2.5 de la décision ASN n°2017-DC-0588.

Cet événement a conduit les membres du Comité de suivi à demander à l'IRSN d'en modéliser les conséquences.

6.1 CONTEXTE

Les différentes étapes de cet incident sont décrites dans une déclaration d'incident transmise par EDF à l'ASN (EDF, 2020). Dans l'ordre chronologique cette note fournit les éléments suivants :

- **Mercredi 16 septembre** : La concentration en tritium initialement mesurée dans un prélèvement du réservoir 0 KER 003 BA est de $2,7 \cdot 10^5 \pm 4,3 \cdot 10^4$ Bq/L.
- **Vendredi 18 septembre** : la fiche EAR de la bache 0 KER 003 BA est rendue à la conduite après validation et le débit de rejet est déterminé en fonction de la concentration mesurée dans le prélèvement du réservoir, du débit de la Loire et du débit du canal de rejet.
- **Samedi 19 septembre 17h20 au lundi 21 septembre 7h** : Rejet de la bache à un débit de $15 \text{ m}^3/\text{h}$.
- **Lundi 21 septembre** : Obtention du résultat d'analyse de l'aliquote 24 h constituée du 20 septembre 9 h au 21 septembre 9 h à la SMP aval. La concentration en tritium est mesurée à $151 \pm 20,6$ Bq/L alors qu'une concentration ajoutée (tous CNPE confondus) d'environ 50 Bq/L est attendue. Une nouvelle préparation pour analyse est réalisée afin de confirmer ce résultat. La concentration mesurée sur ce nouvel échantillon est de $142 \pm 19,6$ Bq/L et la concentration en tritium de l'échantillon aliquote B amont du 20 au 21 septembre 2020 est mesurée à $30,8 \pm 7,11$ Bq/L.
- **Mardi 22 septembre** : la concentration détectée à la station B aval, conduit EDF à requestionner le rejet de la bache 0 KER 003 BA réalisé du samedi 19 septembre 17 h 20 au lundi 21 septembre 7 h. Cette nouvelle mesure donne une concentration en tritium de $1,03 \cdot 10^6 \pm 1,63 \cdot 10^5$ Bq/L, soit 3,8 fois plus que la valeur initialement mesurée.

À partir de cette nouvelle valeur, EDF a corrigé le calcul de la concentration moyenne théorique ajoutée par le rejet du 20/09/2020 au 21/09/20 en utilisant les paramètres ci-dessous :

- concentration de la bache 0 KER 003 BA : $1,03 \cdot 10^6$ Bq/L ;
- débit fixé du rejet : $15 \text{ m}^3/\text{h}$;
- débit de la Loire : $61,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Avec ces données, la concentration moyenne ajoutée par le rejet est :

$$\frac{1,03 \times 10^6 \times \frac{15}{3600}}{61,4} \approx 70 \text{ Bq/L}$$

La concentration totale ajoutée à la SMP aval est donc la concentration ajoutée du rejet KER complétée par la concentration amont (31 Bq/L), soit : $70 + 31 = 101 \text{ Bq/L}$.

La note d'EDF précise que le traitement du bilan du rejet par la prise en compte des heures exactes de débit et de fin de rejet et du débit de la Loire sur la période de rejet, donne finalement une concentration totale ajoutée de 58 Bq/L au lieu des 70 Bq/L initialement calculés ci-dessus. Cette dernière valeur est celle reportée dans le registre des rejets liquides radioactifs du mois de septembre 2020 (section conséquences des rejets KER).

Les panaches des rejets du CNPE de Chinon ne sont pas homogénéisés au niveau de la SMP aval et il y a peu de chance que la concentration totale ajoutée corresponde à la concentration mesurée à la SMP, celle-ci n'étant représentative que du bord gauche des panaches. Pour vérifier l'analyse d'EDF, il est donc pertinent de s'appuyer sur une modélisation 2D des concentrations induites au droit de la SMP aval du CNPE de Chinon par le rejet réalisé du samedi 19 septembre 17 h 20 au lundi 21 septembre 7 h.

6.2 MODELISATION

Pour rappel, les données d'entrées du modèle 2D sont la description de la Loire entre le CNPE de Chinon et sa SMP aval, le débit et la concentration en tritium de la Loire à l'amont du CNPE et les caractéristiques du rejet.

Paramètres

La description de la Loire est associée au réseau calibré à partir du traçage EDF du 25 octobre 2017 ($cy = 0,7$) au cours duquel le débit moyen de la Loire ($97 \text{ m}^3/\text{s}$) à l'amont du CNPE de Chinon était le plus proche de la valeur moyenne de $66 \text{ m}^3/\text{s}$ obtenue par modélisation 1D sur la période du rejet. Ce débit moyen de $66 \text{ m}^3/\text{s}$ étant similaire aux $61,5 \text{ m}^3/\text{s}$ appliqués par EDF, c'est cette dernière valeur qui est finalement retenue pour rester en cohérence avec l'analyse d'EDF.

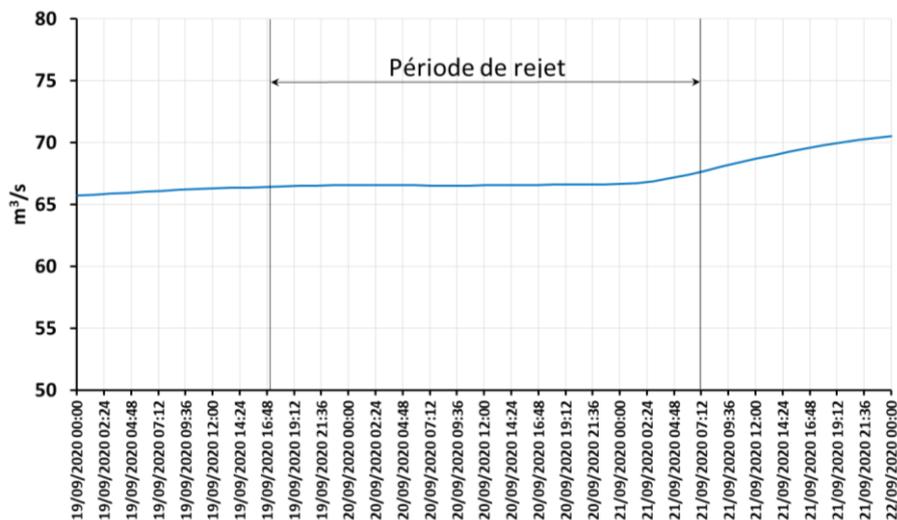


Figure 94 : Modélisation 1D du débit de la Loire à l'amont du CNPE de Chinon entre le 19 et le 21 septembre 2020

Comme pour le débit, la concentration moyenne de tritium dans la Loire à l'amont du CNPE de Chinon est estimée à partir des modélisations 1D sur la période du rejet.

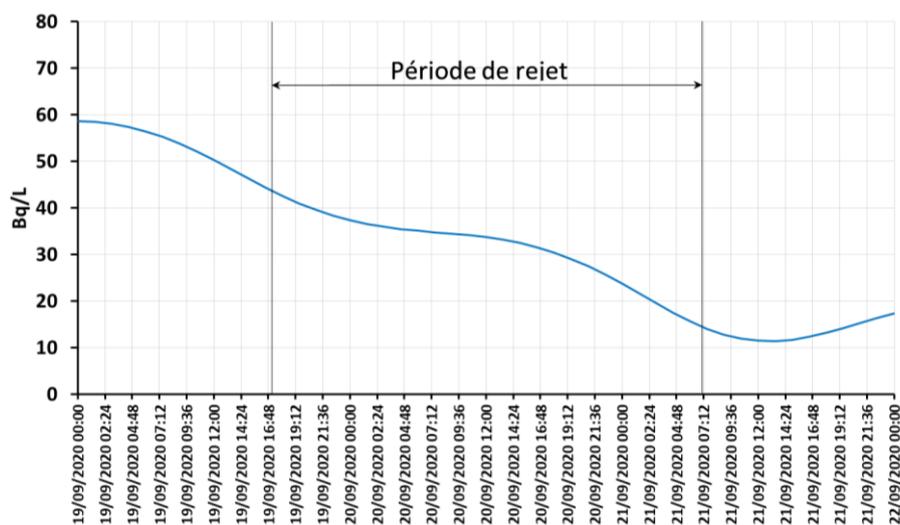


Figure 95 : Modélisation 1D de la concentration en tritium de la Loire à l'amont du CNPE de Chinon entre le 19 et le 21 septembre 2020

Du début à la fin du rejet cette concentration évolue de 43 Bq/L à 15 Bq/L avec une valeur moyenne d'environ 30 Bq/L similaire aux 31 Bq/L mesurés par EDF sur l'aliquote amont.

Résultats

Sur la base de ces données, la figure suivante présente une première évaluation des concentrations en tritium au droit de la SMP aval en considérant un débit de rejet de $1,13 \cdot 10^6$ Bq/s déduit de l'estimation initiale de la concentration en tritium de la bache de rejet ($2,7 \cdot 10^5$ Bq/L) et du débit de rejet ($15 \text{ m}^3/\text{h}$).

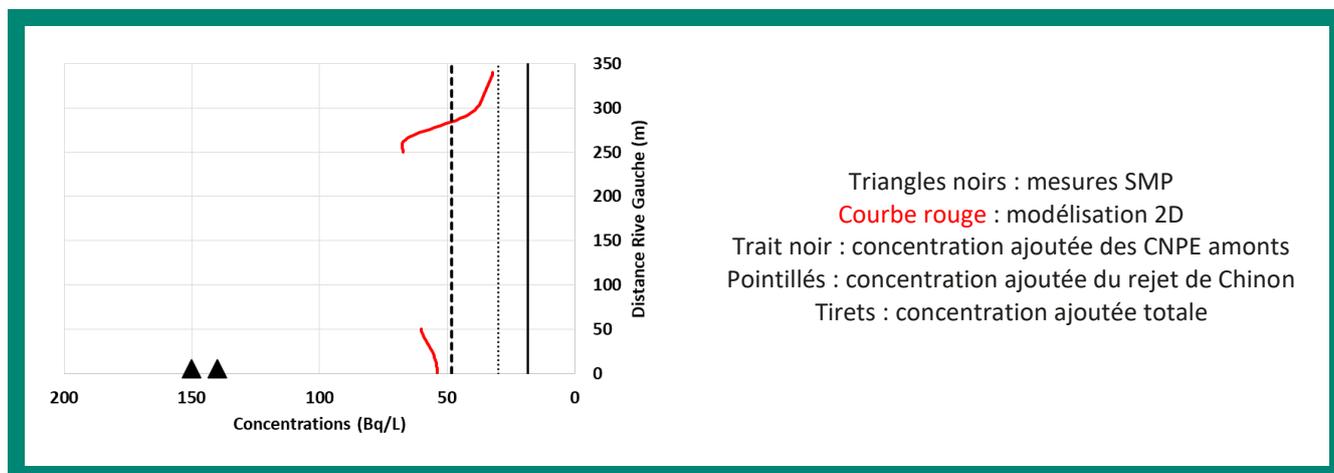


Figure 96 : Modélisation 2D au droit de la SMP aval entre le 19 et le 21 septembre 2020 avec la concentration bache initialement mesurée à $2,7 \cdot 10^5$ Bq/L

Ce premier calcul illustre bien que les 150 Bq/L mesurés à la SMP aval sont un indicateur fort d'une erreur de rejet. À la suite des investigations d'EDF, la figure suivante, présente le même calcul avec une concentration bache corrigée d'un facteur 3,8, soit de $1,03 \cdot 10^6$ Bq/L.

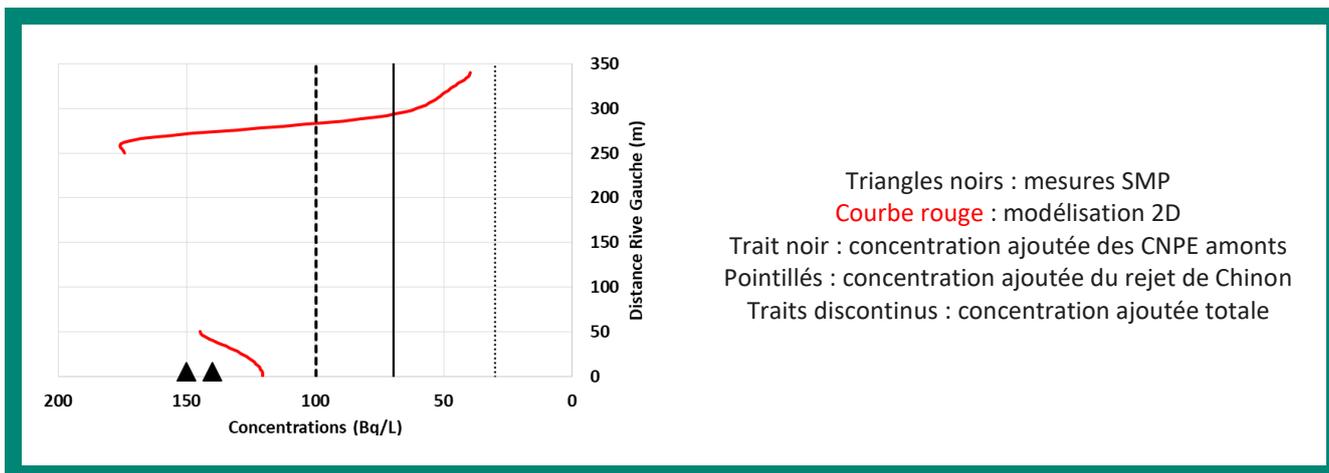


Figure 97 : Modélisation 2D au droit de la SMP aval entre le 19 et le 21 septembre 2020 avec la concentration bêche corrigée d'un facteur 3,8

Avec le facteur correctif de la concentration de la bêche à 3,8, le modèle approche 150 Bq/L à la SMP aval mais reste inférieur d'une vingtaine de Bq/L à la mesure au même point. Pour interpréter cet écart, il faut considérer que la calibration hydrographique a été effectuée pour un débit de la Loire à 97 m³/s, alors que le débit du jour de l'incident était à 61 m³/s, 30% plus faible. A ce régime, il est attendu que les largeurs d'écoulement soient réduites et, comme le montre la Figure 98, une réduction de 5% est suffisante pour que les concentrations modélisées correspondent aux concentrations mesurées à la SMP.

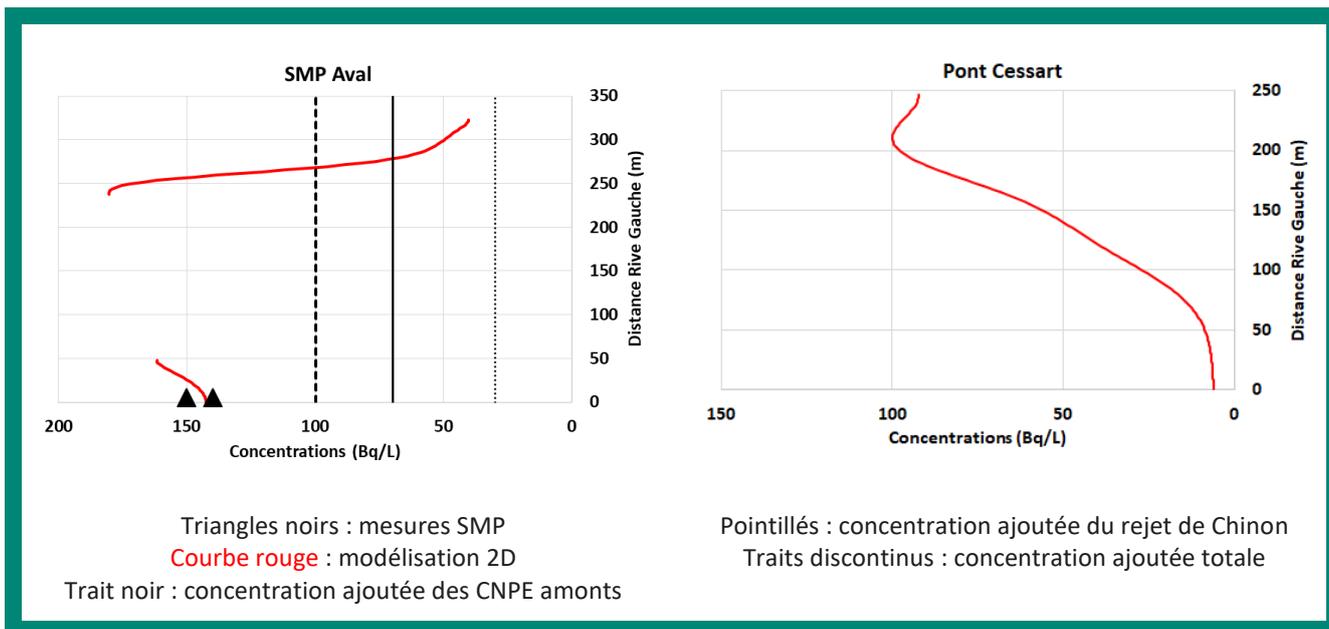


Figure 98 : Modélisation 2D au droit de la SMP aval et au pont Cessart entre le 19 et le 21 septembre 2020 avec la concentration bêche corrigée d'un facteur 3,8 et les largeurs de l'écoulement réduites de 5 %

Au pont Cessart, ces résultats évaluent le pic de concentration à environ 100 Bq/L.

CONCLUSIONS SUR LA MODELISATION DE L'ÉVÉNEMENT DE SEPTEMBRE 2020

Cet incident souligne le rôle central de la SMP aval sans laquelle l'erreur de rejet n'aurait probablement pas été détectée.

De fait, l'analyse de ce cas met en exergue la nécessité d'étudier comment améliorer la capacité de la SMP à détecter les rejets du CNPE de Chinon en toutes circonstances, en particulier en la rendant moins dépendante des différents régimes hydrauliques de la Loire afin de garantir notamment la détection d'éventuels rejets non maîtrisés du CNPE.

CONCLUSIONS

Le 18 juin 2019, l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO) publiait les résultats d'une campagne de mesures citoyennes dans la Loire et la Vienne. Elle attirait l'attention du public et des autorités sur le niveau anormalement élevé d'une des mesures de concentration en tritium (310 Bq/L), effectuée sur un prélèvement d'eau réalisé le 21 janvier 2019 dans la Loire, à Saumur, au niveau du pont Cessart.

Après avoir pris connaissance des résultats publiés par l'ACRO, l'IRSN a indiqué qu'un tel niveau était très supérieur aux niveaux habituellement mesurés dans la Loire au moyen des outils de surveillance de routine. En effet, la concentration la plus élevée mesurée en tritium dans la Loire depuis 2012 à la station multi-paramètres (SMP) aval du CNPE de Chinon et déclarée au RNM était de 80 Bq/L, et la concentration en tritium la plus élevée à Saumur estimée par l'IRSN à partir des données de la surveillance sur la période 2017-2019 était de 60 Bq/L.

L'IRSN et l'ASN ont étudié plusieurs pistes pour tenter d'expliquer cette mesure atypique : hypothèse d'un rejet exceptionnel du CNPE de Chinon ou de plusieurs CNPE amont, hypothèse d'une autre source de tritium, analyse du processus de prélèvement et de mesure du 21 janvier 2019²¹. En octobre 2020, l'IRSN concluait de ses investigations préliminaires que l'hypothèse d'un mélange imparfait des rejets de la centrale de Chinon, entraînant une hétérogénéité de distribution du tritium dans le lit du fleuve sur de longues distances, du fait de conditions hydrauliques particulières, méritait d'être approfondie par une étude sur le terrain.

L'IRSN et l'ASN ont donc décidé de réaliser une campagne spécifique de mesure, qui s'est déroulée sur cinq mois de novembre 2020 à avril 2021, mettant en œuvre des prélèvements à « haute fréquence » (7 par jour en 5 points différents) à Saumur, dans des conditions les plus proches possibles de celles observées en janvier 2019.

La campagne de mesure des concentrations en tritium dans la Loire à Saumur avait pour objectifs :

- d'étudier la reproductibilité de la mesure anormalement élevée de tritium au pont Cessart dans des conditions proches de celles du prélèvement citoyen de janvier 2019 ;
- de comparer les mesures aux modélisations ;
- d'en partager les enseignements avec les parties prenantes.

Ces objectifs doivent permettre de vérifier si l'hypothèse d'un mélange imparfait des rejets de la centrale de Chinon – entraînant une hétérogénéité des concentrations en tritium dans la Loire sur de longues distances – peut conduire, dans certaines conditions, à mesurer des pics de concentrations en tritium de 310 Bq/L à Saumur.

ETUDE DE LA REPRODUCTIBILITE DE LA MESURE ANORMALEMENT ELEVEE (310 BQ/L) DE TRITIUM AU PONT CESSART

Au total, au cours de cette étude, qui s'est déroulée sur 5 mois du 9 novembre 2020 au 8 avril 2021, 1106 prélèvements dans les eaux de la Loire au niveau du pont Cessart à Saumur ont été réalisés ainsi qu'environ 200 prélèvements complémentaires qui ont tous fait l'objet d'une mesure de leur concentration en tritium dans les laboratoires de l'IRSN.

Les concentrations en tritium mesurées au pont Cessart n'ont pas dépassé 57 Bq/L, y compris dans des conditions environnementales similaires (fin novembre 2020 - début décembre 2020) à celles de janvier 2019.

Les mesures réalisées (plus de 1000) au cours des 5 mois de cette étude, dont les niveaux ont varié entre le seuil de décision (2,3 Bq/L environ) et 57 Bq/L, n'ont pas mis en évidence de concentrations en tritium au pont Cessart à Saumur comparables à la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019.

²¹ Les investigations menées par l'IRSN ont fait l'objet de trois notes d'information, publiées sur son site internet (www.irsn.fr) les 20 juin 2019, 19 juillet 2019 et 17 octobre 2019 (www.irsn.fr). L'ASN a rendu compte des diverses investigations menées et actions engagées par des communiqués de presse publiés les 19 juin 2019, 17 octobre 2019 et 20 octobre 2020 sur son site internet (www.asn.fr).

COMPARAISON DES MESURES AUX MODELISATIONS

Pour cette étude, l'IRSN a mis en œuvre une modélisation 1D avec SYMBIOSE (hypothèse de mélange transversal homogène) et développé spécifiquement une modélisation 2D avec CASTEAUR 2D (modélisation de la distribution transversale des concentrations).

Cette étude a permis de mieux comprendre les phénomènes de dispersion (1D et 2D) des rejets entre Chinon et le pont Cessart (transect) et l'importance des facteurs suivants :

- la contribution des différents rejets : les CNPE en amont de Chinon sur la Loire, le CNPE de Chinon et le CNPE de Civaux ;
- les débits de la Loire et de la Vienne et leurs conséquences sur le mélange des eaux Loire-Vienne en aval de la confluence des deux fleuves (le pont Cessart étant situé 13 km en aval de cette confluence).

Les concentrations en tritium issues des modélisations 1D de la dispersion des rejets entre Chinon et Saumur pendant la campagne rendent bien compte des mesures de concentration en tritium dans la Loire en supposant que la Loire et la Vienne ne se mélangent pas pour la plupart des régimes hydrauliques. Lorsque les débits sont particulièrement faibles, les eaux de la Loire et de la Vienne semblent mieux mélangées, de sorte que la modélisation supposant le mélange des deux cours d'eau est la plus adaptée.

Ces résultats sont confortés par les modélisations 2D, qui présentent un haut niveau de cohérence avec les mesures de terrain et permettent d'appréhender les contributions des rejets du CNPE de Chinon, des CNPE amont de la Loire et du CNPE de Civaux aux distributions transversales des concentrations en tritium de la Loire entre le CNPE de Chinon et Saumur.

Il a été constaté que le mélange des rejets déclarés par l'exploitant du CNPE de Chinon :

- n'est pas complet au niveau de la SMP aval : lors du passage des rejets de Chinon, les mesures peuvent être proches, inférieures ou supérieures à la prévision de la modélisation supposant leur mélange homogène ;
- n'est également pas complet jusqu'au pont Cessart à Saumur.

L'étude a également montré que le mélange des rejets de Chinon, dans des conditions de faibles débits de la Loire, se fait plus rapidement et sur une distance plus courte.

ETUDE DE L'HYPOTHÈSE D'UN MELANGE IMPARFAIT DES REJETS DE CHINON POUVANT CONDUIRE A MESURER UNE CONCENTRATION EN TRITIUM DE 310 BQ/L A SAUMUR ?

Stratification thermique des rejets

Dans sa note d'information du 19/07/19, l'IRSN suggérait que la zone de mélange des rejets pouvait être déplacée vers l'aval du fleuve du fait d'un phénomène de stratification thermique. Chaque prélèvement de la campagne de mesure a fait l'objet d'une mesure de la température de l'eau qui a pu être comparée aux mesures « en continu » (toutes les 10 minutes) de la température de la Loire à Saumur au niveau du pont Cessart effectuées depuis 2016 par la DREAL Pays de la Loire au moyen d'une sonde fixe située au fond, en rive droite. Sur la période de novembre 2020 à fin janvier 2021 (avant la crue qui a conduit à un ensablement de la sonde), il n'y a pas d'écart notable de température entre le fond (mesures DREAL) et à proximité de la surface aux différents points de mesures IRSN.

De plus, sur la période de la campagne, de novembre 2020 à avril 2021, les températures dans les prélèvements proches de la surface au milieu du pont – où passent la majorité des panaches du CNPE de Chinon (voir ci-après) – ne montrent pas d'écart systématique avec les températures mesurées des côtés gauche et droit alors qu'une stratification thermique devrait s'accompagner d'une augmentation de la température proche de la surface au lieu de passage de ces panaches.

En ce sens, il n'a pas été mis en évidence de phénomène de stratification thermique au niveau du pont Cessart au cours de cette campagne.

L'étude (campagne de suivi thermique des rejets de Chinon) présentée par EDF à la réunion de suivi du 28 juin 2021 montre également que, « au-delà de 6 km du point de rejet, la masse d'eau échauffée n'est plus visible et la température de l'eau de la Loire est considérée homogène ».

Au cours de la campagne de mesure, il n'a pas été mis en évidence de phénomènes de stratification thermique entre l'eau du fond et l'eau proche de la surface au niveau du pont Cessart.

A la station multi-paramètres (SMP) aval du CNPE de Chinon

Cette étude a permis de mieux connaître la représentativité des prélèvements à la SMP aval au regard des rejets de Chinon en fonction des débits de la Loire. Dans l'ensemble, les modélisations 1D et les mesures de concentrations en tritium dans l'eau sont du même ordre de grandeur et évoluent selon les mêmes tendances. Néanmoins, l'analyse des résultats conduit à faire les constats suivants :

- le mélange des rejets de Chinon n'est pas complet au niveau de la SMP aval. Lors du passage des rejets de Chinon, les mesures peuvent être proches, inférieures ou supérieures à la prévision de la modélisation supposant leur mélange homogène ;
- les mesures à la SMP aval ne permettent pas toujours de détecter les rejets de Chinon. Lors du passage des rejets de Chinon, les mesures peuvent être bien inférieures aux prévisions de la modélisation (supposant leur mélange complet), proches de la contribution des seuls rejets des CNPE amont.

La modélisation 2D confirme la représentativité limitée des mesures à la station SMP aval de Chinon, en fonction des conditions de débits de la Loire, vis-à-vis des rejets déclarés du CNPE de Chinon. Le prélèvement à 5 m de la berge gauche détecte la partie gauche des panaches des rejets de Chinon alors que les pics passent essentiellement dans le bras droit du fleuve, à l'opposé du point de prélèvement.

L'étude a montré que la SMP aval permet de détecter de manière satisfaisante les rejets du CNPE de Chinon lorsque les débits de la Loire sont faibles, inférieurs à 100 m³/s.

Compte tenu du positionnement du point de prélèvement, situé à 5 m de la rive gauche, qui le place plus ou moins en bordure gauche des panaches en fonction du débit de la Loire, les prélèvements à la SMP aval peuvent être représentatifs ou non des rejets du CNPE de Chinon :

- pour des débits inférieurs à 100 m³/s, les mesures mi-rejet à la SMP sont représentatives des rejets du CNPE de Chinon ;
- pour des débits supérieurs, les mesures à la SMP deviennent essentiellement représentatives des rejets des CNPE amont et ne détectent pas ou très peu les rejets du CNPE de Chinon.

Au pont Cessart à Saumur

L'étude a montré que les rejets de Chinon et les masses d'eaux issues de la Loire et de la Vienne ne sont pas complètement mélangés au niveau du pont Cessart à Saumur.

La comparaison des mesures et des modélisations montre que les concentrations en tritium le long du transect de la Loire au pont Cessart sont principalement influencées par les apports de la « Loire amont » du côté de la rive droite, par les apports de la Vienne du côté de la rive gauche, et par l'ensemble des CNPE au milieu du pont où passent le plus souvent les panaches des rejets du CNPE de Chinon.

Après le calage du modèle (CASTEAUR 2D) à partir des mesures des études de dilution d'EDF, les résultats de la modélisation 2D à Saumur ont été comparés avec les mesures de l'ACRO et de l'IRSN faites entre 2019 et 2021 à différents régimes de débit et de rejets. On observe un bon accord entre ce modèle et ces mesures, à l'exception de la valeur atypique de 310 Bq/L.

L'IRSN a appliqué la modélisation 2D aux rejets des CNPE effectués juste avant le 21 janvier 2019 en différents points depuis la proximité immédiate de la clarinette de rejet du CNPE de Chinon jusqu'au pont Cessart à Saumur. Cette modélisation 2D met en exergue de fortes concentrations en tritium dans l'axe du panache sur plusieurs kilomètres à l'aval du rejet (par exemple de plus de 500 Bq/L à l'aval immédiat du rejet).

Au niveau du pont Cessart à Saumur, les modélisations conduisent à une concentration maximale en tritium dans la Loire le 21 janvier 2019 variant entre 70 Bq/L et 160 Bq/L suivant les hypothèses retenues pour le paramétrage hydrographique, avec un maximum de concentration localisé au centre du pont, où a été relevée la mesure atypique.

Au niveau du pont Cessart à Saumur, considérant les rejets déclarés par l'exploitant conformément à la réglementation, les modélisations conduisent à une concentration maximale en tritium dans la Loire le 21 janvier 2019 variant entre 70 Bq/L et 160 Bq/L suivant les hypothèses retenues pour le paramétrage hydrographique.

Les mesures et modélisations n'ont donc pas permis, même dans des conditions majorantes, de retrouver le niveau de la mesure atypique (310 Bq/L).

En outre, si des phénomènes de « chenalisation » peuvent exister dans certaines conditions hydrauliques, en particulier à bas débit, l'étude a montré, notamment par le bon accord entre les modélisations 2D et les mesures de terrain, que l'influence de ceux-ci ne permet pas d'expliquer la mesure atypique de 310 Bq/L. Au contraire, à faible débit, l'étude a montré que le mélange des rejets était plus rapide.

Influence de l'état de la clarinette

Lors des réunions du Comité de suivi, des questionnements sont apparus sur le fonctionnement de la clarinette et ses conséquences sur le mélange des rejets du CNPE de Chinon dans la Loire et sur les mesures réalisées au pont Cessart. La Cli de Chinon a présenté des mesures thermographiques faites en aval immédiat de la clarinette de rejet à la réunion du 18/01/2021 du Comité de suivi et EDF a présenté les résultats de ses campagnes par suivi thermique réalisées en aval des rejets du CNPE de Chinon. Ces présentations sont disponibles sur le site internet de l'IRSN sur la page dédiée à l'étude du tritium dans la Loire.

Afin de répondre à la question de l'influence de l'état de fonctionnement de la clarinette des rejets du CNPE de Chinon sur les mesures de concentrations en tritium au pont Cessart, l'IRSN a réalisé des modélisations 2D, dans les conditions du 21 janvier 2019, des concentrations en tritium dans la Loire en fonction de diverses configurations hypothétiques de fonctionnement de cette clarinette (rejets 100% via la buse droite, 100% via la buse centrale, 100% via la buse gauche et enfin rejet homogène sur toute la largeur de la clarinette, c'est-à-dire via les 11 buses espacées de cinq mètres.

Ces modélisations conduisent l'IRSN à conclure que, dans les conditions du 21 janvier 2019, si l'état de la clarinette impacte les concentrations en tritium dans les eaux de la Loire dans le champ proche du rejet et le positionnement du panache à la SMP aval, il n'a que très peu d'effet à l'aval de la confluence avec la Vienne et en particulier à Saumur et n'explique pas la mesure atypique à 310 Bq/L faite à Saumur.

MODELISATION DE L'HYPOTHESE D'UN REJET NON MAITRISE EN JANVIER 2019

A la réunion du 18 juin 2021 du Comité de suivi, des associations ont demandé à l'IRSN de modéliser les conséquences d'un hypothétique rejet non maîtrisé par le CNPE de Chinon entre le 19 et 21 janvier 2019 (hypothèse invalidée par l'inspection de l'ASN du 21 juin 2019), dans les mêmes hypothèses que celles constatées sur le rejet non maîtrisé du CNPE de Chinon, effectué entre le 19 et le 21 septembre 2020, ayant fait l'objet d'une déclaration d'évènement significatif pour l'environnement à l'ASN (concentration en tritium rejetée 4 fois plus importante que la concentration prévue).

La modélisation 2D réalisée par l'IRSN dans les conditions précitées (rejet multiplié par 4 fois par rapport à celui déclaré par EDF) montre que, dans les conditions de débits de la Loire entre le 19 et le 21 janvier 2019, la concentration en tritium dans l'axe du panache atteindrait dès lors, à Saumur, des niveaux équivalents ou supérieurs à la valeur atypique de 310 Bq/L.

La modélisation montre également qu'avec le débit de la Loire entre le 19 et le 21 janvier 2019, les mesures à la SMP n'auraient probablement pas permis de détecter une hausse significative de la concentration en tritium due à cet hypothétique rejet non-maîtrisé.

L'hypothèse investiguée dans ce calcul théorique, qui suppose pour l'effluent une concentration en tritium 4 fois supérieure à celle rapportée dans le registre de rejet, est peu plausible car cette concentration sortirait très largement de la gamme habituelle et relèverait d'une situation exceptionnelle par rapport aux concentrations rapportées, entre janvier 2018 à avril 2021, pour l'ensemble des CNPE du bassin versant de la Loire.

Les modélisations montrent que, dans le cas d'un rejet ayant une concentration en tritium 4 fois supérieure à celle rapportée dans le registre de rejet du CNPE de Chinon de janvier 2019, la concentration en tritium dans l'axe du panache atteindrait dès lors à Saumur des niveaux équivalents ou supérieurs à la valeur atypique de 310 Bq/L.

Cette hypothèse semble cependant peu plausible compte tenu de la concentration induite dans l'effluent, qui dépasserait de façon très significative les niveaux des effluents des registres de rejets entre janvier 2018 et avril 2021 pour le CNPE de Chinon.

Néanmoins, ces modélisations montrent également qu'une erreur dans le processus de maîtrise des rejets (concentration, débit...) pourrait entraîner une concentration en tritium en aval du CNPE très supérieure aux prévisions de l'exploitant sans pour autant être systématiquement détectée par les analyses des prélèvements à la SMP aval.

MODELISATION DU REJET DE SEPTEMBRE 2020

Avant que la campagne IRSN ne commence, EDF a déclaré un incident au sujet d'un rejet d'effluent liquide effectué en Loire par le CNPE de Chinon entre le 19 septembre à 17 h 20 et le 21 septembre à 7 h (EDF, 2020). Cet incident, consécutif à une analyse erronée de la concentration en tritium de la bêche 0 KER 003 BA, s'est traduit par une sous-estimation des quantités rejetées et, tous CNPE confondus, par une concentration ajoutée en Loire supérieure à 100 Bq/L et au dépassement de la limite de 140 Bq/L prévue à l'article 3.2.5 de la décision ASN n°2017-DC-0588. Cet évènement a conduit les membres du Comité de suivi à demander à l'IRSN d'en modéliser les conséquences.

La modélisation de l'évènement souligne le rôle central de la SMP aval sans laquelle l'erreur de rejet n'aurait probablement pas été détectée.

L'analyse de ce cas met en exergue la nécessité d'étudier comment améliorer la capacité de la SMP à détecter les rejets du CNPE de Chinon en toutes circonstances, en particulier en la rendant moins dépendante des différents régimes hydrauliques de la Loire, et à garantir notamment la détection d'éventuels rejets non maîtrisés du CNPE.

ENSEIGNEMENTS

Cette étude, fondée sur plus de 1000 mesures de concentrations de tritium dans la Loire réalisées sur une période de 5 mois (novembre 2020 à avril 2021) avec des conditions environnementales variées (débit, rejet, température...) et sur des modélisations (1D et 2D) de la dispersion du tritium rejeté entre Chinon et Saumur présentant un haut niveau de cohérence avec les mesures de terrain, rend peu probable l'hypothèse qu'un mélange imparfait des rejets du CNPE de Chinon dans le milieu, sur de longues distances, ou qu'une stratification thermique des rejets, puisse expliquer la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019.

Cette étude a néanmoins permis d'approfondir les connaissances, notamment sur :

- les protocoles de rejets des effluents liquides des CNPE du bassin versant de la Loire ;
- le mélange des rejets du CNPE dans la Loire entre Chinon et Saumur et les mécanismes qui l'influencent (rejets des CNPE, débits de la Loire et de la Vienne) ;
- la modélisation (1D et 2D) de la dispersion des rejets pour expliquer les mesures, notamment de surveillance, ainsi que l'influence de la clarinette sur la dispersion des rejets ;
- la représentativité des mesures de surveillance faites à la SMP compte tenu de l'étalement transversal du panache de rejet en fonction du régime hydraulique de la Loire.

En outre le caractère pluraliste du Comité de suivi a permis de nourrir les échanges, de partager les résultats d'études réalisées par ses membres et de répondre aux questionnements soulevés lors des réunions.

RECOMMANDATIONS

Afin de capitaliser les connaissances et enseignements acquis lors de cette étude, l'IRSN formule les recommandations suivantes :

MODELISATION

L'IRSN recommande l'utilisation de la modélisation de la dispersion des rejets dans la surveillance de l'environnement des CNPE, en complément des prélèvements et mesures des exploitants, de l'IRSN et de la société civile, qui doivent satisfaire au plus haut niveau de qualité (normes) et de traçabilité.

Il s'agit en particulier de :

1. **Développer la modélisation des rejets pour confirmer la représentativité des mesures de surveillance :**
 - au moyen des déclarations détaillées des rejets de l'exploitant ;
 - le cas échéant, au moyen des informations préalables des périodes de rejets, même avec des incertitudes.
2. **Poursuivre les travaux d'amélioration des modèles, au travers notamment de la comparaison des modélisations 1D et 2D entre l'IRSN et EDF.**

PRELEVEMENTS ET MESURES

Pour les activités de surveillance de l'environnement par prélèvement :

3. **L'IRSN préconise de mettre en œuvre des dispositifs permettant de garantir la traçabilité de tous les prélèvements et le respect des normes.**
4. **Concernant la mesure de ces prélèvements, l'IRSN rappelle la nécessité et préconise de continuer à recourir à des laboratoires disposant d'un agrément RNM.**

STATION MULTI-PARAMETRES (SMP) AVAL DU CNPE DE CHINON

Concernant les mesures réglementaires effectuées à la SMP et au positionnement de cette station :

5. **L'IRSN recommande de corriger certaines dates déclarées au Réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM) des prélèvements pour les aliquotes journaliers des CNPE (dates de début et de fin de prélèvements) et d'expliquer comment sont déterminées les mesures à mi-rejet déclarées au RNM (cas de rejets longs et/ou fractionnés) (voir détails ci-après).**
6. **L'IRSN recommande d'étudier comment la détection des rejets du CNPE de Chinon par la SMP aval de Chinon pourrait être rendue moins dépendante des différents régimes hydrauliques de la Loire (en envisageant par exemple la modification du point de prélèvement) et notamment garantir la détection d'éventuels rejets non maîtrisés du CNPE.**

CLARINETTE DE REJETS

Pour donner suite aux échanges autour du fonctionnement de la clarinette :

7. **L'IRSN recommande de poursuivre les vérifications régulières de l'état de fonctionnement de la clarinette.**

Déclaration au RNM des mesures sur prélèvements aliquotes moyens journaliers

La mesure effectuée sur l'échantillon aliquote moyen journalier est déclarée par EDF au RNM.

La mesure sur l'échantillon aliquote moyen journalier, constitué de 24 prélèvements horaires effectués par EDF à la SMP aval à partir de 10 h le jour J jusqu'à 10 h le jour J+1, est remontée dans le RNM en renseignant le jour J+1 dans le champ « Date de début de prélèvement » et en ne renseignant pas le champ « Date de fin de prélèvement ».

5.i. L'IRSN recommande qu'EDF déclare dans le RNM pour une mesure sur un tel prélèvement aliquote moyen journalier :

- la date de début de prélèvement, dans le champ dédié ;
- la date de fin de prélèvement, dans le champ dédié.

Par ailleurs, l'heure de début de prélèvement pourrait être renseignée dans le champ « commentaire » de la mesure.

Prélèvements à mi-rejet

Règlementairement, EDF doit réaliser un prélèvement dit à mi-rejet à la SMP aval, c'est-à-dire à l'instant où la moitié du volume des effluents rejetés considérés a atteint la station multi-paramètres aval, lors de chaque rejet d'effluents liquides radioactifs des réservoirs T et S.

Les registres de rejet font apparaître un certain nombre de prélèvements de contrôle pour les rejets d'effluents liquides radioactifs. En fonction de la durée du rejet d'un effluent, de l'éventuel fractionnement de ce dernier et de la durée de rejet de ces fractions, il semble que tout ou partie de ces prélèvements de contrôle fasse l'objet d'une déclaration dans le RNM en tant que mesure à "mi-rejet".

5.ii. L'IRSN recommande qu'EDF :

- explique comment il détermine sa mesure à mi-rejet et celle qu'il déclare au RNM, notamment en cas de rejets longs et/ou de rejets fractionnés ;
- indique si cette règle est identique pour tous les CNPE du bassin versant de la Loire ou l'explique par CNPE, le cas échéant ;
- déclare, si ce n'est pas le cas, une mesure à mi-rejet pour chaque fraction de rejet.

Par ailleurs, EDF pourrait renseigner dans le champ « commentaire » de chaque mesure à mi-rejet :

- la fraction d'effluent concernée ;
- l'heure du prélèvement à mi-rejet en plus de la date.

REMERCIEMENTS

L'IRSN tient à remercier la DDT 49, la Mairie de Saumur, le SDIS 49 et le restaurant "Sur les quais" à Saumur pour avoir permis la mise en place des équipements et leur fonctionnement pendant la durée de l'étude. L'IRSN remercie également la société Inovalys pour la réalisation des prélèvements de l'étude, ainsi qu'EDF pour la mise à disposition de l'IRSN des prélèvements réalisés à la SMP amont.

L'IRSN remercie également l'ensemble des membres du Comité de suivi pour leur participation et leurs apports à cette étude, ce qui a permis un travail collaboratif en toute transparence et dans un climat serein et constructif. Malgré les conditions sanitaires imposées par la pandémie, le Comité s'est réuni à 4 reprises, permettant ainsi à ses membres d'être informés des résultats de l'étude au fur et à mesure, de demander des modélisations complémentaires et de partager les enseignements.

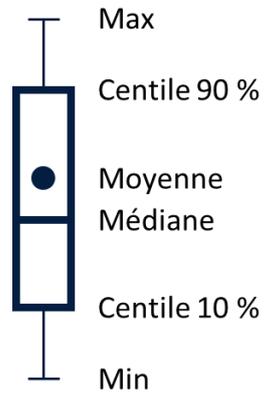
L'IRSN remercie enfin la Cli du CNPE de Chinon et ses membres pour son accueil, l'attention portée à cette étude et les échanges nourris avec ses membres.

ANNEXES

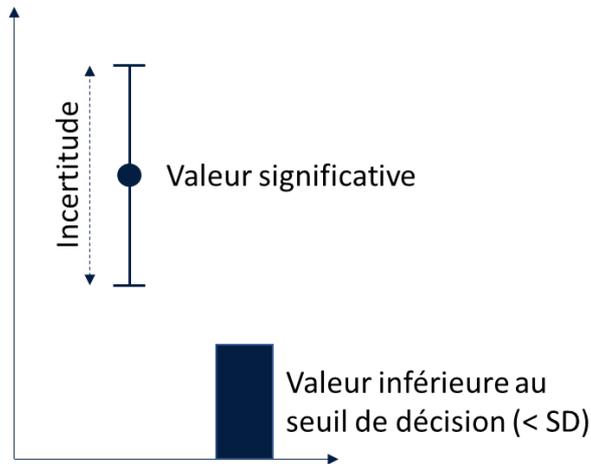
10.1 REPRESENTATION DES DONNEES

Les représentations graphiques utilisées dans le rapport sont les suivantes :

Boîte à moustache



Valeurs significatives / Valeurs inférieures au seuil de décision



10.2 MODELISATION 1D : PLATEFORME SYMBIOSE ET CODE CASTEAUR

Les modélisations 1D ont été réalisées à partir de SYMBIOSE Version 3, qui est une plateforme de simulation du transfert de radionucléides dans les écosystèmes et de calcul de leur impact dosimétrique sur l'homme et le biota non humain. La modélisation de la dispersion et des transferts au sein des compartiments abiotiques en rivière s'appuie sur le code CASTEAUR dont la version 0.3 est encapsulée dans SYMBIOSE. Initialement développé pour être appliqué en situation de crise, ce code suppose une dilution latérale complète et instantanée des effluents et se compose de plusieurs modules pour représenter de façon relativement simplifiée et opérationnelle le cours d'eau et les évolutions spatio-temporelles de l'hydraulique, de la dynamique sédimentaire et, in fine, des concentrations de radionucléides dans l'eau (Bq/L), les matières en suspension (Bq/kg), les sédiments (Bq/kg) et les composantes d'une chaîne trophique élémentaire (Bq/kg).

Dans la mesure où le tritium interagit peu avec les particules solides et que cette étude est limitée à la colonne d'eau, seuls les modules hydrographique, hydraulique et de transferts des radionucléides dans la colonne d'eau sont détaillés ci-après.

Modélisation du domaine de calcul

Le cours d'eau est représenté par un linéaire constitué d'une suite de biefs. Chaque bief b est caractérisé par sa longueur (L_b), sa rugosité quantifiée par le coefficient de Strickler ($Ks_{b,i}$), sa pente (i_b) et une suite de sections trapézoïdales, chacune étant définie par sa position dans le bief ($PK_{b,i}$), sa largeur au plafond ($l_{b,i}$) et l'angle de ses berges ($\theta_{b,i}$).

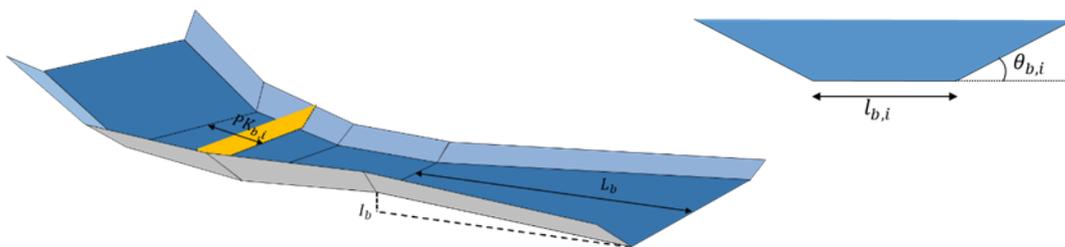


Figure 99 : Représentation du cours d'eau dans le code CASTEAUR

Par interpolation de ces données, le domaine est ensuite maillé en fonction du pas d'espace Δx (m) demandé par l'utilisateur.

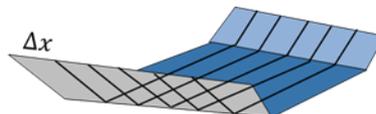


Figure 100 : Illustration du maillage d'un bief au pas d'espace Δx

De même, l'utilisateur précise la durée de la période modélisée et le pas de temps Δt avec lequel cette période doit être discrétisée. Ainsi, les résultats hydrauliques et de concentrations seront représentatifs des valeurs moyennes à chaque pas de temps et dans chacune des mailles de calcul.

Modélisation de l'hydraulique

Le modèle hydraulique propose une approche pseudo-dynamique monodimensionnelle qui suppose que l'écoulement est toujours dirigé de l'amont vers l'aval et qui impose que la pente du lit du cours d'eau soit toujours négative. À chaque pas de temps et en chaque maille, il évalue les transferts et les paramètres hydrauliques à partir d'une équation dynamique 1D pour la conservation de la masse et de l'équation de Manning-Strickler pour le bilan de quantité de mouvement. La première apporte une évaluation dynamique des transferts d'eau (débits) de l'amont vers l'aval en intégrant les apports des affluents et la seconde détermine les paramètres hydrauliques (essentiellement la vitesse débitante et le tirant d'eau) sous l'hypothèse d'un régime permanent et uniforme. Ces deux équations sont respectivement les suivantes :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \sigma_w \quad \text{Équation 4}$$

$$U = Ks \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{-i} \quad \text{Équation 5}$$

Avec : t , le temps (s), x , la distance (m), S , la section mouillée trapézoïdale (m^2), Q , le débit ($m^3.s^{-1}$), σ_w , les termes de perte ou de gain ($m^2.s^{-1}$), U , la vitesse débitante ($m.s^{-1}$), R , le rayon hydraulique (m) et i , la pente ($m.m^{-1}$) qui doit être nécessairement négative.

L'hypothèse de section trapézoïdale permet d'exprimer la section mouillée en fonction de la hauteur d'eau h (m) :

$$S = h \times \left(l + \frac{h}{\tan \theta} \right) \quad \text{Équation 6}$$

Avec la relation $Q = U \cdot S$, h devient la seule inconnue des équations 4 et 5 qui sont discrétisées sous une forme numérique et résolues par une méthode itérative appliquée à chaque pas de temps en parcourant les mailles de calcul de l'amont vers l'aval.

Aux paramètres du réseau maillé, le paramétrage du modèle hydraulique nécessite d'ajouter la chronique du débit à l'entrée du cours d'eau et les chroniques des apports par les différents affluents.

Modélisation des concentrations

La modélisation des concentrations applique une approche dynamique monodimensionnelle 1D qui suppose que les effluents sont instantanément dilués sur toute la largeur du cours d'eau. Le tritium ayant peu d'affinité pour les particules solides, les interactions sédimentaires n'ont pas été activées. De même, la décroissance radioactive a été négligée au regard de la période de décroissance du tritium (12,3 ans) et des quelques jours de temps de transit dans le domaine de calcul. Avec ces hypothèses, la modélisation des concentrations est basée sur l'équation classique de transport-dispersion 1D qui s'écrit de la façon suivante :

$$\frac{\partial C_T \cdot S}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_T)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(S \cdot K \cdot \frac{\partial C_T}{\partial x} \right) + \sigma_{C_T} \quad \text{Équation 7}$$

Avec : t , le temps (s), x , la distance (m), C_T , la concentration en tritium ($Bq.m^{-3}$), K , le coefficient de dispersion longitudinale ($m^2.s^{-1}$), σ_{C_T} , les termes sources représentatifs des rejets des CNPE ($Bq.m^{-1}.s^{-1}$).

Cette équation est discrétisée sous une forme numérique résolue à chaque pas de temps et en parcourant les mailles de l'amont vers l'aval.

En complément aux paramètres hydrographique et hydraulique, les paramètres de ce modèle sont la localisation et les chroniques de rejet des différents CNPE du domaine de calcul.

Synthèse des paramètres de calcul

Les paramètres à renseigner pour un cas de calcul s'organisent en 4 groupes :

Tableau 36 : Synthèse des paramètres de calcul

1. Domaine de calcul	Nombre de biefs		
	Ordonnancement des indices de biefs de l'amont vers l'aval		
	Pour chaque bief :	Longueur	(m)
		Pente	(m/m)
		Coefficient de Strickler	($m^{1/3}/s$)
	Nombre de section		
	Tableau des sections ordonnées de l'amont vers l'aval		
2. Hydraulique	Débits amont et entrants par les affluents	Pour chaque section :	PK dans le bief (m)
			Largeur au plafond (m)
			Angle des berges (°)
			(m^3/s)

	Débits de perte aux défluent	(m ³ /s)
3. Sources	Nombre de CNPE	
	Localisation des CNPE dans les biefs	
	Chroniques de rejet en tritium de chaque CNPE	(Bq/s)
4. Paramètres de calcul	t : Durée simulée	(s)
	Δt : Pas de temps des calculs	(s)
	Δx : Pas d'espace longitudinal	(m)

10.3 MODELISATION 2D : CASTEAUR 2D

Le code CASTEAUR 2D a été utilisé en complément aux modélisations 1D afin de mieux décrire les répartitions longitudinale et transversale des panaches de tritium sur le tronçon compris entre le CNPE de Chinon et la ville de Saumur. Il s'agit d'un code semi-empirique destiné à l'expertise opérationnelle. A ce titre, sa mise en œuvre requière une étape préalable de calibration à partir d'observations in-situ, comme cela a été effectué pour cette étude à partir des traçages effectués par EDF sur le tronçon de la Loire entre le CNPE de Chinon et la ville de Saumur.

Avec l'hypothèse que les concentrations sont rapidement homogènes dans le plan vertical²², le code CASTEAUR 2D est basé sur la solution analytique de l'équation de transport-dispersion 2D en régime permanent et uniforme. Pour ces conditions, le champ de concentration en tritium (C_T) dans les plans longitudinal (x) et latéral (y) consécutif à un rejet ponctuel et permanent (Figure 101) peut être représenté par la relation suivante :

$$C_T(x, y) = \frac{q_T}{h \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot Ky \cdot (x - x_r)}} \cdot e^{-\frac{U \cdot (y - y_r)^2}{4 \cdot Ky \cdot (x - x_r)}} \quad \text{Équation 8}$$

Avec :

$C_T(x, y)$	Concentration en tritium au point de coordonnées x, y	(Bq/m ³)
U	Vitesse débitante de l'écoulement	(m/s)
h	Hauteur d'eau	(m)
Ky	Coefficient de diffusion latérale	(m ² /s)
q_T	Débit de rejet en tritium	(Bq/s)
x_r, y_r	Coordonnées du point de rejet	(m)

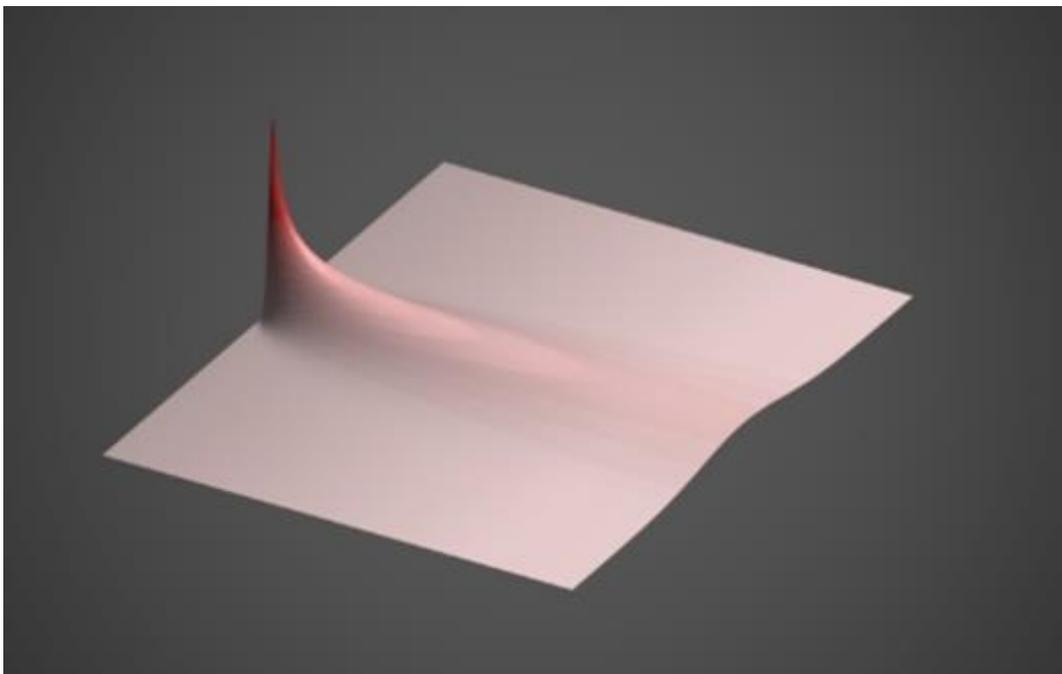


Figure 101 : Illustration d'un champ de concentration donné par l'équation 1 pour un rejet ponctuel

Sur la base de cette équation, le code CASTEAUR 2D décline les étapes suivantes :

1. Modélisation du domaine de calcul

²² En l'absence de phénomène thermique et d'effet de densité, cette hypothèse est généralement vérifiée à une distance d'environ 60 fois le rayon hydraulique à l'aval des rejets (Graf et Altinakar, 1996).

2. Modélisation de l'hydraulique
3. Modélisation des concentrations

Ces différentes étapes sont décrites ci-après.

Modélisation du domaine de calcul

Le domaine de calcul est la portion de rivière où le champ de concentration doit être modélisé. Ce domaine est décrit par des biefs supposés rectangulaires et représentant des parties uniformes de la rivière. Ces biefs peuvent être organisés en série et/ou parallèle et sont ordonnés de l'amont vers l'aval et de la rive droite vers la rive gauche.

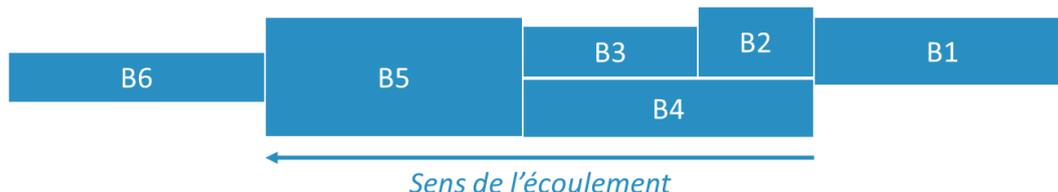


Figure 102 : Exemple d'organisation des biefs de calcul

Pour une condition de débit donnée, chaque bief i est décrit par sa longueur (L_i), sa largeur (l_i), sa pente (i_i), sa rugosité quantifiée par le coefficient de Strickler (Ks_i) et son paramètre de diffusion transversale (cy_i). Les entrées de biefs peuvent être reliées à un affluent en rive droite et en rive gauche et à un, plusieurs ou aucun bief amont. De même, les sorties de biefs peuvent avoir un défluent en rive droite et/ou en rive gauche et être reliées à un, plusieurs ou aucun biefs aval.

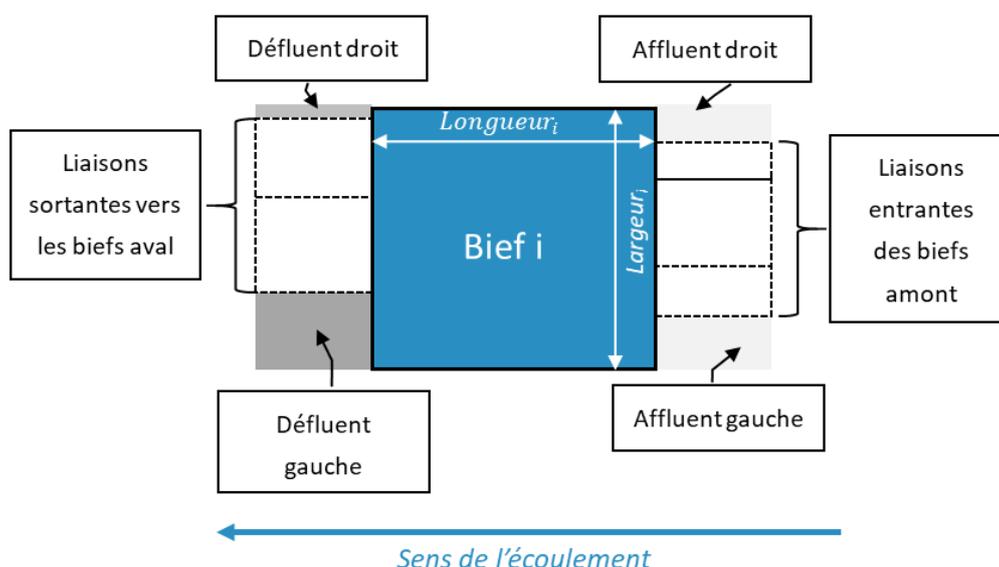


Figure 103 : Représentation et principaux paramètres d'un bief

Les paramètres complémentaires sont les largeurs des affluents droit et gauche et des défluent droit et gauche et les largeurs des liaisons entrantes et sortantes à partir desquelles sont déterminées les connectivités entre les biefs. Ces connectivités sont données par une matrice qui relie et précise les largeurs de ces liaisons. Sur une ligne de cette matrice, les valeurs au-delà de la diagonale indiquent les largeurs des liaisons sortantes du bief de la ligne vers les biefs des colonnes ($ls_{i,j}$) et les valeurs qui précèdent la diagonale indiquent les largeurs des liaisons entrantes du bief de la ligne qui sont reliées aux biefs des colonnes ($le_{i,j}$).

Modélisation de l'hydraulique

Pour chaque bief i du domaine de calcul, le modèle hydraulique évalue la hauteur d'eau h_i (m), la vitesse débitante U_i (m/s) et le coefficient de diffusion latérale Ky_i (m²/s) en fonction des données hydrauliques et des connectivités.

Les données hydrauliques sont les débits des affluents droit et gauche des biefs (Q_{ad_i} , Q_{ag_i}), les débits d'apports spécifiques à chaque bief (q_{e_i}) et les pourcentages de distribution des débits aux défluent droit et gauche (p_{dd_i} et p_{dg_i}) et aux liaisons sortantes ($p_{q_{i,j}}$). Ces pourcentages peuvent être imposés et/ou déterminés au prorata des largeurs des liaisons sortantes et des défluent droit et gauche et leur somme doit être égale à 100%.

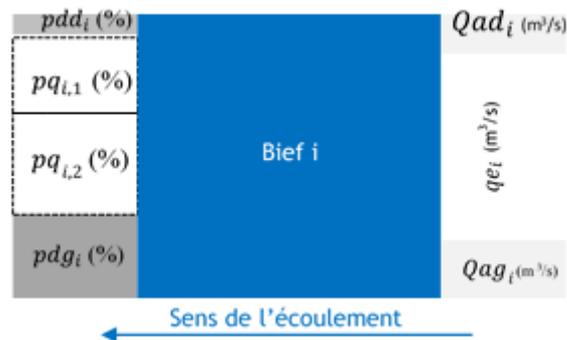


Figure 104 : Données hydrauliques à un bief

Avec ces données et en considérant que l'écoulement est orienté de l'amont vers l'aval, les débits aux biefs sont déterminés avec la relation suivante :

$$Q_i = Q_{e_i} + Q_{ad_i} + Q_{ag_i} + \sum_{j \neq i} p_{q_{i,j}} \cdot Q_{s_j} \quad \text{Équation 9}$$

$$\text{Où les débits sortants sont : } Q_{s_j} = Q_j - Q_{dd_j} - Q_{dg_j} \quad \text{Équation 10}$$

Connaissant les débits, les hauteurs d'eau (h_i) aux biefs sont données par la relation de Manning-Strickler en supposant que les sections sont de forme rectangulaire.

$$h_i = \left(\frac{Q_i}{l_i \cdot K_{S_i} \cdot \sqrt{l_i}} \right)^{3/5} \quad \text{Équation 11}$$

Par la suite, les hauteurs d'eau permettent de déduire les vitesses débitantes (U_i) et les coefficients de diffusion transversale (Ky_i) :

$$U_i = \frac{Q_i}{h_i \cdot l_i} \quad \text{Équation 12}$$

$$Ky_i = cy_i \cdot h_i \cdot \sqrt{g \cdot h_i \cdot l_i} \quad \text{Équation 13}$$

Cette dernière équation correspond à la relation de Fisher dans laquelle le coefficient cy_i n'est pas associé à un nom particulier. Pour les besoins de ce rapport, il est nommé ici paramètre de diffusion. C'est un paramètre empirique et donc de calibration auquel le code permet d'attribuer une valeur spécifique à chaque bief. Il n'existe pas de relation théorique pour le déterminer et les données de la bibliographie indiquent qu'il peut varier de 0,15 pour des canaux réguliers jusqu'à 0,9 pour des cours d'eaux irréguliers avec des méandres fortement prononcés. Pour la plupart des cours d'eaux, ces données lui attribuent des valeurs comprises entre 0,4 et 0,8.

Modélisation des concentrations

À chaque bief, les données d'entrée nécessaires au calcul des concentrations sont les apports de radionucléides définis par les bruits de fond des affluents droit et gauche (cad_i et cag_i (Bq/l)) et des liaisons entrantes ($ce_{i,j}$ (Bq/l)) et les différents points de rejet caractérisés par leur distance à l'entrée ($x_{i,r}$) et à la rive droite ($y_{i,r}$) du bief et leurs débits de rejet ($q_{i,r}$ (Bq/s)).

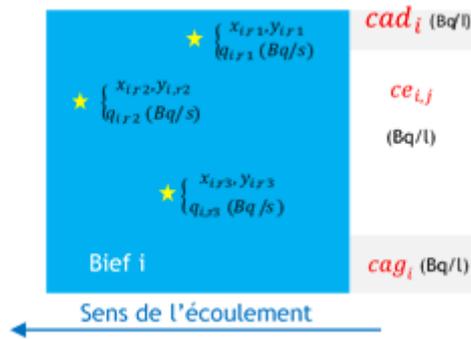


Figure 105 : Données des apports

Les concentrations en tout point du domaine de calcul sont déterminées par la somme des contributions de toutes les sources (bruits de fond et rejets). Pour cela, le modèle prend en compte les effets de rebonds sur les berges et les flux aux affluents et aux liaisons entrantes des biefs.

Rebonds sur les berges

L'équation 7 s'applique à un domaine infini qui n'est pas limité par des berges, comme c'est le cas dans une rivière. Pour tenir compte de ces limites, les flux envoyés au-delà des berges sont réinjectés dans la rivière en complétant chaque source par des sources images réparties de part et d'autre des berges afin de corriger les rebonds successifs du panache.

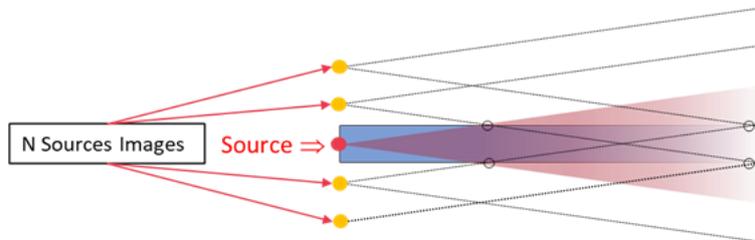


Figure 106 : Correction des rebonds sur les berges du panache issue d'un point source

Flux aux affluents et aux liaisons des biefs

À l'échelle du domaine de calcul, les transferts entre les biefs impliquent de déterminer les flux aux liaisons des biefs. Cette opération s'effectue en cinq étapes :

1. Discrétisation des affluents par des points sources répartis en fonction du pas d'espace latéral Δy (m) ;
2. Discrétisation des liaisons sortantes par des points sources répartis en fonction du pas d'espace latéral Δy (m) et projection de ces points vers les liaisons entrantes correspondantes ;

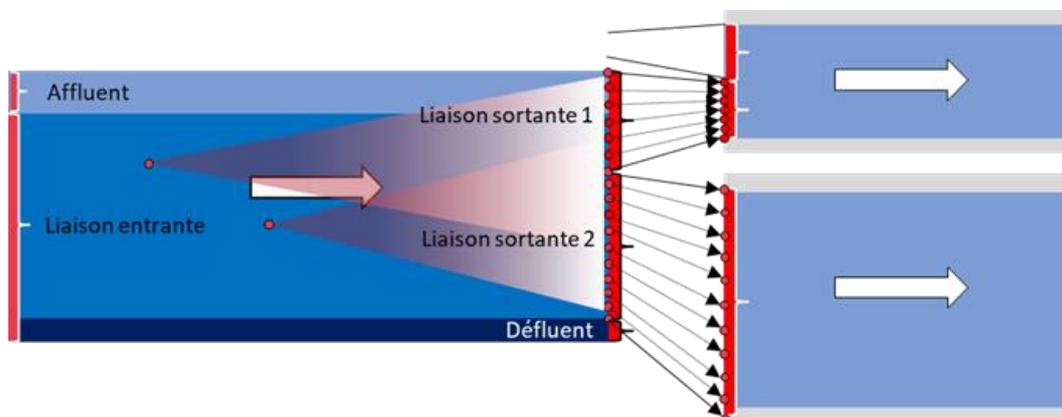


Figure 107 : Discrétisation des liaisons sortantes et projection vers les liaisons entrantes

3. Détermination des flux aux points sources discrétisés des affluents en fonction de leur bruit de fond et en leur attribuant une fraction du débit affluent ;

4. Détermination des flux aux points sources discrétisés des liaisons sortantes en leur attribuant une fraction du débit de la liaison et en déterminant leur concentration en fonction de toutes les sources du bief ;
5. Détermination des flux aux points sources discrétisés des liaisons entrantes en sommant les flux projetés depuis les liaisons sortantes et induits par leur bruit de fond.

Calcul des concentrations aux points d'intérêt

Après ces opérations, la concentration en tout point d'un bief est déterminée en sommant les contributions de tous ses points sources (rejets, sources discrétisées aux affluents et aux liaisons entrantes) et de leurs sources images calculées au moyen de l'Équation 8.

Synthèse des paramètres de calcul

Les paramètres à renseigner pour un cas de calcul s'organisent en 4 groupes :

Tableau 37 : Synthèse des paramètres de calcul

1. Domaine de calcul	Nombre de biefs	
	Ordonnancement des indices de biefs de l'amont vers l'aval et de la rive droite vers la rive gauche	
	Pour chaque bief :	
	Longueur	(m)
	Largeurs des liaisons entrantes et sortantes et des affluents et défluent droits et gauches	(m)
	Pente	(m/m)
2. Hydraulique	Coefficient de Strickler	($m^{1/3}/s$)
	Paramètre de diffusion	(-)
	Débits des affluents droit et gauche	(m^3/s)
	Débits d'apport aux liaisons entrantes	(m^3/s)
	Pourcentages de distributions des débits aux défluent et aux liaisons sortantes	(%)
3. Sources	Bruits de fond des concentrations aux affluents et liaisons entrantes	(Bq/L)
	Rejets définis par leur bief, leurs coordonnées et leurs débits de rejet	(Bq/s)
4. Paramètres de calcul	NI : Nombre de sources images attribuées à chaque terme source	
	Δy : Pas d'espace de discrétisation latérale des flux	(m)
	Liste des points d'intérêt pour le calcul des concentrations	

10.4 PARAMETRAGE DES BIEFS DE CALCUL ET MATRICES DE CONNECTIVITE POUR LA MODELISATION 2D

Campagne du 27 mars 2019

Tableau 38 : Paramètres des biefs de calcul pour la campagne du 27 mars 2019

Nom	Longueur (m)	Affluent droit (m)	Liaison entrante (m)	Affluent gauche (m)	Défluent droit (m)	Liaison sortante (m)	Défluent gauche (m)
Bief 1	440	0	175	75	0	250	0
Bief 2	670	80	220	0	0	300	0
Bief 3	150	0	330	0	0	330	0
Bief 4	1700	0	110	0	0	110	0
Bief 5	90	0	180	0	0	180	0
Bief 6	850	0	50	0	0	50	0
Bief 7	280	0	106	0	0	106	0
Bief 8	1900	0	90	0	0	90	0
Bief 9	230	0	240	0	0	240	0
Bief 10	330	0	150	0	0	150	0
Bief 11	340	0	30	0	0	30	0
Bief 12	200	0	173	0	0	173	0
Bief 13	210	0	130	0	0	130	0
Bief 14	1000	0	300	0	0	300	0
Bief 15	150	0	185	0	0	185	0
Bief 16	150	0	120	0	0	120	0
Bief 17	750	0	40	0	0	40	0
Bief 18	455	0	230	0	0	230	0
Bief 19	260	0	275	0	0	275	0
Bief 20	270	0	360	0	0	360	0
Bief 21	900	0	175	0	0	175	0
Bief 22	980	0	100	0	0	100	0
Bief 23	480	0	345	0	0	345	0
Bief 24	200	0	295	90	0	385	0
Bief 25	750	0	350	0	0	350	0
Bief 26	570	0	400	0	0	400	0

Tableau 39 : Matrice de connectivité pour la campagne du 27 mars 2019

BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1	0	250																									
2	220	0	300																								
3		330	0	240				90																			
4			110	0	110																						
5				180	0	50	130																				
6					50	0						50															
7						106																					
8		90					0		106																		
9							150	90		0	210	30															
10									150	0		20	130														
11										30			30														
12						70					103																
13											100	30															
14												150	150														
15														173													
16														200	100												
17														185	0	10	175										
18														120													
19															40												
20															160	70											
21																	0	230									
22																		275	0								
23																			320								
24																				0	260	100					
25																				175	0			175			
26																				100		0	100				
																					295	50			345		
																						0			350		
																							295	0	385		
																								350	0	350	
																									400	0	

Les valeurs au-dessus de la diagonale indiquent les largeurs des liaisons sortantes du bief de la ligne vers le bief de la colonne et les valeurs en dessous de la diagonale correspondent aux largeurs des liaisons entrantes du bief de la colonne dans le bief de la ligne.

Campagne du 24 juin 2020

Tableau 40 : Paramètres des biefs de calcul pour la campagne du 24 juin 2020

Nom	Longueur (m)	Affluent droit (m)	Liaison entrante (m)	Affluent gauche (m)	Défluent droit (m)	Liaison sortante (m)	Défluent gauche (m)
Bief 1	440	0	175	75	0	250	0
Bief 2	670	80	220	0	0	300	0
Bief 3	150	0	330	0	0	330	0
Bief 4	1700	0	110	0	0	110	0
Bief 5	90	0	180	0	0	180	0
Bief 6	850	0	50	0	0	50	0
Bief 7	280	0	106	0	0	106	0
Bief 8	1900	0	90	0	0	90	0
Bief 9	230	0	240	0	0	240	0
Bief 10	330	0	150	0	0	150	0
Bief 11	340	0	30	0	0	30	0
Bief 12	200	0	173	0	0	173	0
Bief 13	210	0	130	0	0	130	0
Bief 14	1000	0	300	0	0	300	0
Bief 15	150	0	185	0	0	185	0
Bief 16	150	0	120	0	0	120	0
Bief 17	750	0	40	0	0	40	0
Bief 18	455	0	230	0	0	230	0
Bief 19	260	0	275	0	0	275	0
Bief 20	270	0	360	0	0	360	0
Bief 21	900	0	175	0	0	175	0

Nom	Longueur (m)	Affluent droit (m)	Liaison entrante (m)	Affluent gauche (m)	Défluent droit (m)	Liaison sortante (m)	Défluent gauche (m)
Bief 22	980	0	100	0	0	100	0
Bief 23	480	0	345	0	0	345	0
Bief 24	200	0	295	90	0	385	0
Bief 25	750	0	350	0	0	350	0
Bief 26	570	0	400	0	0	400	0
Bief 27	1290	0	112	0	0	112	0
Bief 28	1300	0	170	0	0	170	0
Bief 29	900	0	300	0	0	300	0
Bief 30	650	0	470	0	0	470	0
Bief 31	550	0	150	0	0	150	0
Bief 32	500	0	130	0	0	130	0
Bief 33	600	0	300	0	0	300	0
Bief 34	650	0	125	0	0	125	0
Bief 35	610	0	180	0	0	180	0
Bief 36	650	0	200	0	0	200	0
Bief 37	550	0	380	0	0	380	0
Bief 38	475	0	140	0	0	140	0
Bief 39	480	0	80	0	0	80	0
Bief 40	500	0	170	0	0	170	0
Bief 41	980	0	280	0	0	280	0
Bief 42	950	0	375	0	0	375	0
Bief 43	1000	0	100	0	0	100	0
Bief 44	665	0	110	0	0	110	0
Bief 45	680	0	240	0	0	240	0
Bief 46	375	0	400	0	0	400	0
Bief 47	1000	0	95	0	0	95	0
Bief 48	640	0	50	0	0	50	0
Bief 49	325	0	150	0	0	150	0
Bief 50	440	0	300	0	0	300	0
Bief 51	640	0	200	0	0	200	0
Bief 52	205	0	265	0	0	265	0

Campagne du 25 octobre 2017

Tableau 42 : Paramètres des biefs de calcul pour la campagne du 25 octobre 2017

Nom	Longueur (m)	Affluent droit (m)	Liaison entrante (m)	Affluent gauche (m)	Défluent droit (m)	Liaison sortante (m)	Défluent gauche (m)
Bief 1	230	0	135	0	0	135	0
Bief 2	840	0	150	0	0	150	0
Bief 3	250	25	125	0	0	150	0
Bief 4	1450	0	110	0	0	110	0
Bief 5	130	0	165	0	0	165	0
Bief 6	880	0	45	0	0	45	0
Bief 7	320	0	95	0	0	95	0
Bief 8	2500	0	50	0	0	50	0
Bief 9	150	0	180	0	0	180	0
Bief 10	380	0	150	0	0	150	0
Bief 11	200	0	140	0	0	140	0
Bief 12	200	0	80	0	0	80	0
Bief 13	980	0	250	0	0	250	0
Bief 14	150	0	350	0	0	350	0
Bief 15	720	0	20	0	0	20	0
Bief 16	450	0	230	0	0	230	0
Bief 17	250	0	260	0	0	260	0
Bief 18	290	0	340	0	0	340	0
Bief 19	840	0	90	0	0	90	0
Bief 20	940	0	50	0	0	50	0
Bief 21	490	0	250	0	0	250	0
Bief 22	195	0	220	80	0	300	0
Bief 23	1120	0	350	0	0	350	0
Bief 24	260	0	440	0	0	440	0

Tableau 43 : Matrice de connectivité pour la campagne du 25 octobre 2017

BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	0	135																							
2	150	0	110					40																	
3		125	0	150																					
4			110	0	110																				
5				165	0	45	120																		
6					45	0								45											
7					95		0			95															
8		50						0		50															
9							170	10	0	180															
10									150	0	60	90													
11						135				5	0		140												
12										80		0	80												
13											200	50	0	250											
14													350	0	125	225									
15														20	0										
16															230		0	230							
17																260	0	260							
18																20		320	0	310	30				
19																			90	0			90		
20																				50		0	50		
21																					245	5	0	250	
22																						220	0	300	
23																							350	0	350
24																								380	0

Les valeurs au-dessus de la diagonale indiquent les largeurs des liaisons sortantes du bief de la ligne vers le bief de la colonne et les valeurs en dessous de la diagonale correspondent aux largeurs des liaisons entrantes du bief de la colonne dans le bief de la ligne.

10.5 RESULTATS D'ANALYSE DES PRELEVEMENTS REALISES EN DOUBLON LORS DES VISITES DE VERIFICATION

Tableau 44 : Contrôles inopinés réalisés au cours de la campagne

Point de prélèvement	Préleveur	Date de prélèvement	Résultats	Seuil de décision
Point F	IRSN	06/01/2021 09:30	3,4 ± 1,8 Bq/L	< 2,3 Bq/L
	Inovalys			< 2,3 Bq/L
Point J	IRSN	06/01/2021 09:40		< 1,8 Bq/L
	Inovalys			
Point C	IRSN	03/03/2021 09:10	6,3 ± 2,6 Bq/L	
	Inovalys		5 ± 3 Bq/L	
Point F	IRSN	03/03/2021 09:20	10,8 ± 2,8 Bq/L	
	Inovalys		8,7 ± 2,7 Bq/L	
Point J	IRSN	03/03/2021 09:30	4,1 ± 2,6 Bq/L	
	Inovalys		3,3 ± 2,5 Bq/L	
Point L	IRSN	03/03/2021 09:35	3,8 ± 2,6 Bq/L	< 2,4 Bq/L
	Inovalys			

10.6 CONCENTRATIONS EN TRITIUM DANS L'EAU DE LA LOIRE

Résultats des analyses des prélèvements réalisés pendant la campagne

Tableau 45 : Coordonnées géographiques WGS84 des points de prélèvements

Point de prélèvement	Latitude	Longitude
Hydrocollecteur rive droite (Hydro RG)	47,262366	-0,073227
Point A	47,263304	-0,074483
Point C	47,262998	-0,074835
Point F	47,262487	-0,075451
Point J	47,261808	-0,076212
Point L	47,261486	-0,076552
Hydrocollecteur rive gauche (Hydro RD)	47,260560	-0,074690

Tableau 46 : Résultats des analyses réalisées sur les prélèvements réalisés pendant la campagne

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
09/11/2020 09:30	Point C	22,22	3,11		8,15	336	12
09/11/2020 09:50	Point F	16,71	3,09		8,05	348	12
09/11/2020 10:00	Point J	8,98	2,85		7,96	326	12
10/11/2020 09:25	Point C	6,68	2,71		8,05	339	12
10/11/2020 09:40	Point F	5,57	2,69		8,06	351	12
10/11/2020 10:00	Point J	16,55	3,14		7,96	328	12,5
11/11/2020 09:30	Point C	3,48	2,61		8,07	337	12
11/11/2020 09:45	Point F	6,22	2,72		8,05	350	12,5
11/11/2020 10:05	Point J	12,76	3,00		8,02	333	12,5
12/11/2020 09:30	Point C			2,47	8,18	333	12,5
12/11/2020 09:45	Point F	3,98	2,64		8,17	347	12,5
12/11/2020 10:00	Point J	16,78	3,14		8,09	341	12,5
13/11/2020 09:30	Point C	13,55	2,95		8,18	336	13
13/11/2020 09:40	Point F	19,84	3,23		8,18	348	13
13/11/2020 09:50	Point J	23,66	3,22		8,08	338	13
14/11/2020 09:25	Point C	25,70	3,49		8,14	333	12,5
14/11/2020 09:40	Point F	30,92	3,76		8,14	349	13
14/11/2020 09:55	Point J	24,53	3,49		8,04	338	13
15/11/2020 09:25	Point C	22,90	3,35		8,19	346	12,5
15/11/2020 09:40	Point F	23,65	3,41		8,17	354	13

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
15/11/2020 09:55	Point J	21,94	3,37		8,11	336	12,5
16/11/2020 09:25	Point C	40,87	3,95		8,18	348	11,5
16/11/2020 09:35	Point F	33,09	3,84		8,17	356	11,5
16/11/2020 09:45	Point J	27,03	3,24		8,08	345	11,5
16/11/2020 21:30	Hydro RD	31,66	3,44				
16/11/2020 21:30	Hydro RG	25,72	3,17				
17/11/2020 09:30	Hydro RD	30,69	3,37				
17/11/2020 09:30	Hydro RG	22,59	3,01				
17/11/2020 10:00	Point C	28,62	3,28		7,91	346	12
17/11/2020 10:10	Point F	29,56	3,33		7,89	355	12
17/11/2020 10:25	Point J	20,63	2,91		7,89	346	12
17/11/2020 21:30	Hydro RD	32,53	3,50				
17/11/2020 21:30	Hydro RG	18,85	2,81				
18/11/2020 09:15	Point C	28,68	3,61		8,15	347	11
18/11/2020 09:25	Point F	22,22	2,95		8,13	358	11
18/11/2020 09:30	Hydro RD	26,12	3,16				
18/11/2020 09:30	Hydro RG	17,46	2,74				
18/11/2020 09:40	Point J	20,58	2,90		8,07	347	11
18/11/2020 21:30	Hydro RD	28,47	3,29				
18/11/2020 21:30	Hydro RG	21,61	2,96				
19/11/2020 09:15	Point C	28,92	3,31		8,29	352	11
19/11/2020 09:25	Point F	27,15	3,23		8,2	356	11
19/11/2020 09:30	Hydro RD	28,37	3,27				
19/11/2020 09:30	Hydro RG	24,74	3,46				
19/11/2020 09:35	Point J	22,74	3,40		8,15	340	11
19/11/2020 21:30	Hydro RD	27,33	3,60				
19/11/2020 21:30	Hydro RG	14,92	3,12				
20/11/2020 09:20	Point C	30,04	3,56		8,42	353	10
20/11/2020 09:30	Hydro RD	30,76	3,76				
20/11/2020 09:30	Hydro RG	26,99	3,61				
20/11/2020 09:30	Point F	17,06	3,19		8,35	358	10
20/11/2020 09:40	Point J	17,66	3,22		8,23	337	10
20/11/2020 21:30	Hydro RD	46,54	4,59				
20/11/2020 21:30	Hydro RG	22,16	3,40				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
21/11/2020 09:20	Point C	39,25	4,20		8,11	364	8,5
21/11/2020 09:30	Hydro RD	39,41	4,13				
21/11/2020 09:30	Hydro RG	26,14	3,59				
21/11/2020 09:30	Point F	33,92	3,94		8,08	361	9
21/11/2020 09:40	Point J	26,91	3,64		7,99	344	9
21/11/2020 21:30	Hydro RD	24,98	3,49				
21/11/2020 21:30	Hydro RG	18,44	3,25				
22/11/2020 09:20	Point C	13,46	2,99		8,31	360	8
22/11/2020 09:30	Hydro RD	13,90	3,00				
22/11/2020 09:30	Hydro RG	19,46	3,30				
22/11/2020 09:30	Point F	11,02	2,91		8,28	358	8
22/11/2020 09:40	Point J	21,02	3,37		8,13	335	8,5
22/11/2020 21:30	Hydro RG	20,12	3,31				
23/11/2020 09:25	Point C	8,22	2,71		8,25	361	8
23/11/2020 09:30	Hydro RD	5,16	2,59				
23/11/2020 09:30	Hydro RG	21,91	3,31				
23/11/2020 09:35	Point F	12,62	2,87		8,25	361	8
23/11/2020 09:45	Point J	19,71	3,24		8,2	343	8,5
23/11/2020 21:30	Hydro RD	6,79	2,66				
23/11/2020 21:30	Hydro RG	19,88	2,49				
24/11/2020 09:20	Point C	7,71	2,70		8,33	360	7,5
24/11/2020 09:30	Hydro RD	4,43	2,58				
24/11/2020 09:30	Hydro RG	21,37	2,55				
24/11/2020 09:30	Point F	7,87	2,71		8,3	364	7,5
24/11/2020 09:40	Point J	18,08	3,18		8,15	349	7,5
24/11/2020 21:30	Hydro RD	10,46	2,78				
24/11/2020 21:30	Hydro RG	21,44	3,29				
25/11/2020 09:20	Point C	14,80	2,27		8,05	361	8
25/11/2020 09:30	Hydro RD	8,32	2,70				
25/11/2020 09:30	Hydro RG	21,42	3,29				
25/11/2020 09:30	Point F	20,70	3,23		8,08	363	8
25/11/2020 09:40	Point J	19,55	3,24		8,03	354	8
25/11/2020 21:30	Hydro RD	13,47	2,89				
25/11/2020 21:30	Hydro RG	20,40	3,26				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
26/11/2020 09:20	Point C	27,74	3,54		8,24	361	8
26/11/2020 09:30	Hydro RD	22,61	2,57				
26/11/2020 09:30	Hydro RG	27,07	3,58				
26/11/2020 09:30	Point F	27,94	3,56		8,24	364	8
26/11/2020 09:40	Point J	28,31	3,65		8,14	349	8
26/11/2020 21:30	Hydro RD	47,67	4,53				
26/11/2020 21:30	Hydro RG	36,07	4,02				
27/11/2020 09:20	Point C	57,02	5,08		8,3	366	8
27/11/2020 09:30	Hydro RD	54,69	4,89				
27/11/2020 09:30	Hydro RG	43,21	4,39				
27/11/2020 09:30	Point F	55,47	5,01		8,24	362	8
27/11/2020 09:40	Point J	41,61	4,32		8,13	344	8
27/11/2020 21:30	Hydro RD	45,14	4,38				
27/11/2020 21:30	Hydro RG	37,30	4,09				
28/11/2020 09:20	Point C	32,05	3,75		8,3	370	8
28/11/2020 09:30	Hydro RG	32,89	3,86				
28/11/2020 09:35	Point F	35,38	3,95		8,3	363	8
28/11/2020 09:45	Point J	35,60	3,99		8,2	347	8
28/11/2020 21:30	Hydro RD	31,89	3,03				
28/11/2020 21:30	Hydro RG	34,27	3,92				
29/11/2020 09:20	Point C	33,49	3,15		8,36	368	7
29/11/2020 09:30	Hydro RD	31,63	3,02				
29/11/2020 09:30	Hydro RG	29,52	3,69				
29/11/2020 09:30	Point F	36,53	4,03		8,35	364	7,5
29/11/2020 09:40	Point J	32,98	3,89		8,25	347	7
29/11/2020 21:30	Hydro RD	29,35	3,30				
29/11/2020 21:30	Hydro RG	31,79	3,51				
30/11/2020 09:20	Point C	12,83	2,75		8,13	371	6
30/11/2020 09:30	Hydro RD	14,26	3,04				
30/11/2020 09:30	Hydro RG	24,75	3,28				
30/11/2020 09:35	Point F	17,05	2,94		8,11	370	6,5
30/11/2020 09:45	Point J	21,05	2,92		8	352	6
30/11/2020 21:30	Hydro RD	29,99	3,74				
30/11/2020 21:30	Hydro RG	29,38	3,50				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
01/12/2020 09:30	Hydro RD	47,45	4,25				
01/12/2020 09:30	Hydro RG	36,69	4,13				
01/12/2020 09:35	Point C	46,23	4,20		8,36	370	7
01/12/2020 09:45	Point F	49,00	4,37		8,3	372	7
01/12/2020 09:55	Point J	42,97	4,10		8,22	347	7
01/12/2020 21:30	Hydro RD	51,78	4,46				
01/12/2020 21:30	Hydro RG	37,01	4,10				
02/12/2020 09:20	Point C	48,33	4,32		8,4	446	5,9
02/12/2020 09:30	Hydro RD	47,76	4,26				
02/12/2020 09:30	Hydro RG	37,69	4,18				
02/12/2020 09:30	Point F	47,31	4,30		8,29	381	6,2
02/12/2020 09:35	Point J	41,67	4,05		8,2	370	6,2
02/12/2020 21:30	Hydro RD	44,61	4,12				
02/12/2020 21:30	Hydro RG	32,92	2,89				
03/12/2020 09:20	Point C	47,48	4,29		8,62	374	6,5
03/12/2020 09:30	Hydro RG	30,32	2,74				
03/12/2020 09:30	Point F	36,53	3,79		8,55	371	7
03/12/2020 09:40	Point J	30,88	3,44		8,45	360	7
03/12/2020 10:10	Hydro RD	43,02	4,04				
03/12/2020 21:30	Hydro RD	51,76	4,46				
03/12/2020 21:30	Hydro RG	33,92	2,95				
04/12/2020 09:20	Point C	53,69	4,58		8,5	372	6
04/12/2020 09:30	Hydro RD	55,60	3,94				
04/12/2020 09:30	Hydro RG	31,35	3,85				
04/12/2020 09:30	Point F	51,43	4,51		8,39	369	6
04/12/2020 09:40	Point J	38,27	3,87		8,41	350	6
04/12/2020 21:30	Hydro RD	47,38	4,25				
04/12/2020 21:30	Hydro RG	31,87	3,89				
05/12/2020 09:20	Point C	38,07	3,83		8,58	373	5
05/12/2020 09:30	Hydro RD	40,04	3,27				
05/12/2020 09:30	Hydro RG	16,81	2,97				
05/12/2020 09:30	Point F	26,17	3,33		8,44	353	5,5
05/12/2020 09:40	Point J	14,51	2,57		8,42	320	5,5
05/12/2020 21:30	Hydro RD	30,71	2,73				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
05/12/2020 21:30	Hydro RG	22,16	3,19				
06/12/2020 09:20	Point C	35,37	4,14		8,61	363	6
06/12/2020 09:30	Hydro RD	36,01	4,05				
06/12/2020 09:30	Hydro RG	29,49	3,53				
06/12/2020 09:30	Point F	35,66	3,78		8,32	299	6,5
06/12/2020 09:40	Point J	29,49	3,42		8,26	250	6,5
06/12/2020 21:30	Hydro RD	35,32	3,88				
06/12/2020 21:30	Hydro RG	33,05	3,88				
07/12/2020 09:20	Point C	37,03	3,98		8,36	378	6
07/12/2020 09:30	Hydro RD	31,60	3,74				
07/12/2020 09:30	Hydro RG	33,54	4,07				
07/12/2020 09:30	Point F	33,46	3,89		8,25	310	6
07/12/2020 09:40	Point J	36,27	4,05		8,22	230	6
07/12/2020 21:30	Hydro RD	18,17	3,12				
07/12/2020 21:30	Hydro RG	34,62	4,14				
08/12/2020 09:20	Point C	18,28	3,06		8,44	381	5,5
08/12/2020 09:30	Hydro RD	16,41	3,05				
08/12/2020 09:30	Hydro RG	20,32	3,46				
08/12/2020 09:30	Point F	18,22	3,19		8,4	341	6
08/12/2020 09:40	Point J	20,72	3,29		8,22	250	6
08/12/2020 21:30	Hydro RD	30,34	3,68				
08/12/2020 21:30	Hydro RG	26,09	3,72				
09/12/2020 09:20	Point C	36,44	3,96		8,41	379	5
09/12/2020 09:30	Hydro RD	33,52	3,82				
09/12/2020 09:30	Hydro RG	32,54	4,03				
09/12/2020 09:30	Point F	31,14	3,77		8,27	335	5,5
09/12/2020 09:40	Point J	31,75	3,82		8,02	253	5,5
09/12/2020 21:30	Hydro RD	34,37	3,87				
09/12/2020 21:30	Hydro RG	29,41	3,87				
10/12/2020 09:20	Point C	42,32	4,26		8,38	378	6
10/12/2020 09:30	Hydro RD	40,74	4,20				
10/12/2020 09:30	Hydro RG	30,42	3,93				
10/12/2020 09:30	Point F	41,87	4,30		8,27	330	6,5
10/12/2020 09:40	Point J	30,42	3,76		8,11	246	6,5

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
10/12/2020 21:30	Hydro RD	37,32	4,02				
10/12/2020 21:30	Hydro RG	30,77	3,95				
11/12/2020 09:25	Point C	30,35	3,64		8,32	342	7,4
11/12/2020 09:30	Hydro RD	24,42	3,40				
11/12/2020 09:30	Hydro RG	28,19	3,81				
11/12/2020 09:30	Point F	32,52	3,81		8,28	319	7,4
11/12/2020 09:40	Point J	25,51	3,52		7,97	239	7,5
11/12/2020 21:30	Hydro RD	17,02	3,07				
11/12/2020 21:30	Hydro RG	22,10	3,45				
12/12/2020 09:20	Point C	7,29	2,64		8,32	374	7,6
12/12/2020 09:30	Hydro RD	5,72	2,66				
12/12/2020 09:30	Hydro RG	27,16	3,67				
12/12/2020 09:30	Point F	17,25	3,10		8,04	306	7,7
12/12/2020 09:40	Point J	27,56	3,60		7,9	231	7,7
12/12/2020 21:30	Hydro RD			2,47			
12/12/2020 21:30	Hydro RG	4,85	2,77				
13/12/2020 09:20	Point C	18,26	3,09		8,18	356	7,5
13/12/2020 09:30	Hydro RD	15,43	3,03				
13/12/2020 09:30	Hydro RG			2,58			
13/12/2020 09:30	Point F	8,71	2,78		8,01	265	7,6
13/12/2020 09:35	Point J	2,72	2,60		7,87	206	7,7
13/12/2020 21:30	Hydro RD	19,78	3,19				
13/12/2020 21:30	Hydro RG			2,56			
14/12/2020 09:20	Point C	27,99	3,59		8,24	360	8,5
14/12/2020 09:30	Hydro RD	29,29	3,34				
14/12/2020 09:30	Hydro RG			2,68			
14/12/2020 09:30	Point F	18,54	3,22		8,14	303	8,5
14/12/2020 09:45	Point J			2,67	8	202	8,5
14/12/2020 21:30	Hydro RD	33,85	3,59				
14/12/2020 21:30	Hydro RG			2,66			
15/12/2020 09:20	Point C	35,46	3,95		8,05	386	8,5
15/12/2020 09:30	Hydro RD	36,00	3,71				
15/12/2020 09:30	Hydro RG			2,68			
15/12/2020 09:30	Point F	23,58	3,42		8,02	345	8,5

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
15/12/2020 09:40	Point J			2,66	7,81	214	8,5
15/12/2020 21:30	Hydro RD	33,27	3,56				
15/12/2020 21:30	Hydro RG			2,67			
16/12/2020 09:20	Point C	41,66	4,28		8,06	363	8
16/12/2020 09:30	Hydro RD	35,75	3,72				
16/12/2020 09:30	Hydro RG			2,66			
16/12/2020 09:30	Point F	29,27	3,69		8,02	361	8
16/12/2020 09:40	Point J			2,67	7,85	231	8
16/12/2020 21:30	Hydro RD	25,05	3,14				
16/12/2020 21:30	Hydro RG			2,65			
17/12/2020 09:20	Point C	7,09	2,72		8,06	348	8
17/12/2020 09:30	Hydro RD	8,19	2,27				
17/12/2020 09:30	Hydro RG			2,64			
17/12/2020 09:30	Point F	4,00	2,67		8,01	343	8
17/12/2020 09:40	Point J			2,57	7,89	227	8
17/12/2020 21:30	Hydro RD	4,68	2,10				
17/12/2020 21:30	Hydro RG			2,64			
18/12/2020 09:20	Point C	6,56	2,71		7,65	327	7,5
18/12/2020 09:30	Hydro RD	2,81	2,02				
18/12/2020 09:30	Point F	10,90	2,88		7,69	331	8
18/12/2020 09:40	Point J	26,61	3,62		7,71	222	8
18/12/2020 21:30	Hydro RD	6,38	2,81				
18/12/2020 21:30	Hydro RG	11,44	3,05				
19/12/2020 09:20	Point C	18,09	3,18		8,01	293	8,5
19/12/2020 09:30	Hydro RD	18,13	3,27				
19/12/2020 09:30	Hydro RG	19,90	3,41				
19/12/2020 09:30	Point F	17,13	3,15		7,98	303	8,5
19/12/2020 09:40	Point J	22,08	3,40		7,86	224	8,5
19/12/2020 21:30	Hydro RD	9,03	2,92				
19/12/2020 21:30	Hydro RG	25,66	3,66				
20/12/2020 09:20	Point C	3,15	2,62		8	277	8
20/12/2020 09:30	Hydro RD	4,12	2,76				
20/12/2020 09:30	Hydro RG	28,60	3,79				
20/12/2020 09:30	Point F	2,98	2,63		7,98	289	8

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
20/12/2020 09:40	Point J	29,60	3,76		7,83	223	8
20/12/2020 21:30	Hydro RD	9,13	2,28				
20/12/2020 21:30	Hydro RG	22,34	3,24				
21/12/2020 09:20	Point C			2,34	7,95	261	8,5
21/12/2020 09:30	Hydro RD	3,83	2,55				
21/12/2020 09:30	Point F	6,63	2,59		7,98	276	8,5
21/12/2020 09:40	Point J	23,26	3,35		7,87	215	8,5
21/12/2020 10:40	Point L	24,34	3,41				
21/12/2020 21:30	Hydro RD			2,50			
21/12/2020 21:30	Hydro RG	3,10	1,95				
22/12/2020 09:25	Point C			2,34	7,96	263	10,7
22/12/2020 09:30	Hydro RG	2,28	1,22				
22/12/2020 09:30	Hydro RD	3,84	2,60				
22/12/2020 09:30	Point F			2,35	7,91	277	10
22/12/2020 09:45	Point J	2,80	2,56		7,85	243	10,5
22/12/2020 21:30	Hydro RD			2,46			
22/12/2020 21:30	Hydro RG			2,43			
23/12/2020 09:20	Point C			2,35	7,46	264	10
23/12/2020 09:30	Hydro RG			1,12			
23/12/2020 09:30	Hydro RD			2,45			
23/12/2020 09:30	Point F			2,36	7,6	278	10
23/12/2020 09:40	Point J			2,38	7,6	257	10
23/12/2020 21:30	Hydro RD	15,32	3,01				
23/12/2020 21:30	Hydro RG	3,83	2,59				
24/12/2020 09:20	Point C	24,63	3,28		8,04	263	9,5
24/12/2020 09:30	Hydro RD	25,01	3,44				
24/12/2020 09:30	Hydro RG	3,72	2,60				
24/12/2020 09:30	Point F	16,02	2,92		8,03	286	9,5
24/12/2020 09:45	Point J			2,39	7,93	242	9,5
24/12/2020 21:30	Hydro RD	16,85	3,07				
24/12/2020 21:30	Hydro RG			2,45			
25/12/2020 09:20	Point C	15,30	2,89		8,16	274	7,5
25/12/2020 09:30	Hydro RD	19,10	3,17				
25/12/2020 09:30	Hydro RG	2,93	2,56				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
25/12/2020 09:30	Point F	10,80	2,73		8,08	293	7
25/12/2020 09:40	Point J			2,40	7,91	245	8
25/12/2020 21:30	Hydro RD	14,33	2,95				
25/12/2020 21:30	Hydro RG			2,45			
26/12/2020 09:20	Point C			2,33	8,04	279	7
26/12/2020 09:30	Hydro RD	6,29	2,61				
26/12/2020 09:30	Hydro RG	3,20	2,59				
26/12/2020 09:30	Point F			2,35	8,03	293	7
26/12/2020 09:40	Point J			2,40	7,82	226	7,5
26/12/2020 21:30	Hydro RD	11,78	2,81				
26/12/2020 21:30	Hydro RG	21,61	3,30				
27/12/2020 09:20	Point C	24,26	3,26		7,9	275	7,5
27/12/2020 09:30	Hydro RD	26,73	3,44				
27/12/2020 09:30	Hydro RG	23,19	3,39				
27/12/2020 09:30	Point F	22,09	3,18		7,94	287	7,5
27/12/2020 09:40	Point J	20,82	3,19		7,78	208	7,5
27/12/2020 21:30	Hydro RD	18,87	3,10				
27/12/2020 21:30	Hydro RG	23,83	3,46				
28/12/2020 09:20	Point C	2,90	2,58		7,46	282	6
28/12/2020 09:30	Hydro RD	4,16	2,10				
28/12/2020 09:30	Hydro RG	25,19	3,33				
28/12/2020 09:30	Point F	6,32	2,70		7,45	297	6
28/12/2020 09:45	Point J	21,10	3,02		7,29	209	6,5
28/12/2020 21:30	Hydro RD	18,45	2,80				
28/12/2020 21:30	Hydro RG	21,68	3,17				
29/12/2020 09:20	Point C	16,55	3,11		7,87	276	6
29/12/2020 09:30	Hydro RD	17,19	2,73				
29/12/2020 09:30	Hydro RG	4,24	2,52				
29/12/2020 09:30	Point F	4,17	2,68		7,8	225	6
29/12/2020 09:40	Point J			1,96	7,78	201	6
29/12/2020 21:30	Hydro RD	16,40	2,70				
29/12/2020 21:30	Hydro RG			2,36			
30/12/2020 09:20	Point C	10,11	2,88		7,95	274	5,5
30/12/2020 09:30	Hydro RD	15,23	2,63				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
30/12/2020 09:30	Hydro RG			2,36			
30/12/2020 09:30	Point F	4,40	2,73		7,91	208	6
30/12/2020 09:40	Point J			2,58	7,79	173,5	6
30/12/2020 21:30	Hydro RD	9,22	2,35				
30/12/2020 21:30	Hydro RG			2,37			
31/12/2020 09:20	Point C	8,24	2,77		8,04	282	6
31/12/2020 09:30	Hydro RD	3,85	2,09				
31/12/2020 09:30	Hydro RG			2,37			
31/12/2020 09:30	Point F			2,53	7,99	240	6
31/12/2020 09:40	Point J			2,56	7,84	181,8	6
31/12/2020 21:30	Hydro RD	4,34	2,12				
31/12/2020 21:30	Hydro RG			2,36			
01/01/2021 09:20	Point C	4,57	2,15		8,14	291	5,3
01/01/2021 09:30	Hydro RD	2,90	2,05				
01/01/2021 09:30	Hydro RG			2,35			
01/01/2021 09:30	Point F	2,67	2,09		7,94	258	5,8
01/01/2021 09:35	Point J			1,96	7,97	195	6
01/01/2021 21:30	Hydro RD	4,68	2,47				
01/01/2021 21:30	Hydro RG			2,33			
02/01/2021 09:20	Point C	8,71	2,31		8,17	291	4,8
02/01/2021 09:30	Hydro RD	7,11	2,54				
02/01/2021 09:30	Point F	7,99	2,30		8,04	274	5
02/01/2021 09:40	Point J			1,93	7,92	199	5,6
02/01/2021 10:00	Point L			2,33	7,97	198	5,5
02/01/2021 21:30	Hydro RD	9,72	2,64				
03/01/2021 09:20	Point C	8,70	2,31		8,21	304	4,9
03/01/2021 09:25	Point F	12,54	2,51		8,08	277	5,1
03/01/2021 09:30	Hydro RD	4,66	2,46				
03/01/2021 09:30	Hydro RG	5,73	2,55				
03/01/2021 09:35	Point J	15,68	2,71		8,04	210	5,5
03/01/2021 09:40	Point L	15,29	2,90		7,99	206	5,5
03/01/2021 21:30	Hydro RD	14,16	2,55				
03/01/2021 21:30	Hydro RG	18,28	2,79				
04/01/2021 09:20	Point C	20,50	2,83		8,4	282	4,5

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
04/01/2021 09:30	Hydro RD	20,05	2,59				
04/01/2021 09:30	Hydro RG	20,79	2,66				
04/01/2021 09:30	Point F	14,53	2,33		8,16	282	4,5
04/01/2021 09:40	Point J	23,75	3,06		8	212	5
04/01/2021 21:30	Hydro RD	8,18	2,26				
04/01/2021 21:30	Hydro RG	21,65	2,69				
05/01/2021 09:20	Point C	3,08	1,95		8,21	271	4,5
05/01/2021 09:30	Hydro RD	2,91	2,00				
05/01/2021 09:30	Hydro RG	21,28	2,66				
05/01/2021 09:30	Point F	3,09	1,79		8,12	283	4,5
05/01/2021 09:40	Point J	20,85	2,90		8,04	228	4,5
05/01/2021 21:30	Hydro RD	4,35	2,08				
05/01/2021 21:30	Hydro RG	16,10	2,40				
06/01/2021 09:20	Point C	3,67	1,97		8,11	278	4,5
06/01/2021 09:30	Hydro RD	4,67	2,10				
06/01/2021 09:30	Hydro RG	2,15	1,76				
06/01/2021 09:30	Point F	3,38	1,78		8,03	285	4,5
06/01/2021 09:40	Point J			1,80	7,84	232	4,5
06/01/2021 21:30	Hydro RD	7,73	2,24				
06/01/2021 21:30	Hydro RG			1,64			
07/01/2021 09:20	Point C	14,59	2,51		8,04	274	4
07/01/2021 09:30	Hydro RD	11,43	2,41				
07/01/2021 09:30	Hydro RG			1,63			
07/01/2021 09:30	Point F	18,31	2,72		7,98	289	4,5
07/01/2021 09:40	Point J			1,80	7,82	228	4,5
07/01/2021 21:30	Hydro RD	12,84	2,47				
07/01/2021 21:30	Hydro RG			1,64			
08/01/2021 09:20	Point C	14,52	2,52		8,17	276	3,5
08/01/2021 09:30	Hydro RD	14,46	2,56				
08/01/2021 09:30	Hydro RG			1,64			
08/01/2021 09:30	Point F	18,48	2,72		8,13	294	4
08/01/2021 09:40	Point J	2,08	1,93		7,97	234	4
08/01/2021 21:30	Hydro RD	5,08	2,10				
08/01/2021 21:30	Hydro RG			1,63			

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
09/01/2021 09:20	Point C	6,74	2,10		8,49	281	3,5
09/01/2021 09:30	Hydro RD	4,72	2,08				
09/01/2021 09:30	Hydro RG			1,62			
09/01/2021 09:30	Point F	15,99	2,57		8,26	308	2,5
09/01/2021 09:40	Point J	2,39	1,95		8,28	235	3,5
09/01/2021 21:30	Hydro RD	2,49	1,98				
10/01/2021 09:20	Point C	5,67	2,05		7,66	282	2,5
10/01/2021 09:30	Hydro RD			1,84			
10/01/2021 09:30	Hydro RG			1,67			
10/01/2021 09:30	Point F	15,67	2,54		7,88	303	3
10/01/2021 09:40	Point J	2,56	1,94		7,66	237	3
10/01/2021 21:30	Hydro RD	2,68	1,96				
10/01/2021 21:30	Hydro RG			1,86			
11/01/2021 09:30	Hydro RD			2,45			
11/01/2021 09:40	Point C			2,64	7,81	285	2,5
11/01/2021 09:50	Point F			1,82	7,84	302	3
11/01/2021 10:00	Point J			2,67	7,84	260	3
11/01/2021 10:50	Hydro RG			2,68			
11/01/2021 21:30	Hydro RD			2,46			
11/01/2021 21:30	Hydro RG			2,46			
12/01/2021 09:20	Point C			2,64	8,07	286	3,5
12/01/2021 09:30	Hydro RD	3,01	2,59				
12/01/2021 09:30	Hydro RG			2,50			
12/01/2021 09:30	Point F	3,97	2,02		8,05	305	4
12/01/2021 09:40	Point J			2,68	7,96	279	4
12/01/2021 21:30	Hydro RD	7,78	2,74				
12/01/2021 21:30	Hydro RG	3,66	2,65				
13/01/2021 09:20	Point C	6,69	2,87		8,05	289	5,5
13/01/2021 09:30	Hydro RD	8,64	2,75				
13/01/2021 09:30	Point F	8,87	2,26		8,05	306	5,5
13/01/2021 09:40	Point J			2,67	8,06	280	6
13/01/2021 10:00	Hydro RG	4,14	2,67				
13/01/2021 21:30	Hydro RD	7,39	2,72				
13/01/2021 21:30	Hydro RG			2,51			

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
14/01/2021 09:25	Point C			2,64	7,7	296	6
14/01/2021 09:30	Hydro RD	4,70	2,64				
14/01/2021 09:35	Point F			1,88	7,94	313	6
14/01/2021 09:45	Point J			2,49	7,96	265	6
14/01/2021 10:00	Hydro RG			2,68			
14/01/2021 21:30	Hydro RD	2,89	2,58				
14/01/2021 21:30	Hydro RG			2,68			
15/01/2021 09:20	Point C	3,65	2,78		8,18	300	6
15/01/2021 09:30	Hydro RD	4,27	2,61				
15/01/2021 09:30	Hydro RG			2,69			
15/01/2021 09:30	Point F	15,16	2,57		8,24	318	6
15/01/2021 09:40	Point J			2,68	8,02	237	6
15/01/2021 21:30	Hydro RD	3,59	2,60				
15/01/2021 21:30	Hydro RG			2,69			
16/01/2021 09:20	Point C	23,15	3,51		8,15	317	5
16/01/2021 09:30	Hydro RD	20,71	3,24				
16/01/2021 09:30	Hydro RG			2,69			
16/01/2021 09:30	Point F	23,32	3,06		8,14	328	5
16/01/2021 09:40	Point J	2,71	2,64		7,96	215	4,5
16/01/2021 21:30	Hydro RD	33,17	3,82				
16/01/2021 21:30	Hydro RG			2,69			
17/01/2021 09:20	Point C	18,54	3,30		8,18	317	5,5
17/01/2021 09:30	Hydro RD	22,20	3,32				
17/01/2021 09:30	Hydro RG			2,72			
17/01/2021 09:30	Point F	15,14	2,61		8,19	325	5,5
17/01/2021 09:40	Point J			2,70	8,09	203	5,5
17/01/2021 21:30	Hydro RD	12,77	2,48				
17/01/2021 21:30	Hydro RG	20,50	2,95				
18/01/2021 09:25	Point C	4,03	2,08		7,85	311	5
18/01/2021 09:30	Hydro RD	7,26	1,82				
18/01/2021 09:30	Hydro RG	26,44	3,60				
18/01/2021 09:35	Point F	3,68	2,06		8,06	318	5,1
18/01/2021 09:40	Point J	23,60	2,72		8,02	218	5,3
18/01/2021 21:30	Hydro RD	6,75	1,80				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
18/01/2021 21:30	Hydro RG	29,31	3,74				
19/01/2021 09:20	Point C	16,98	2,75		8,03	269	4,5
19/01/2021 09:30	Hydro RD	15,91	2,29				
19/01/2021 09:30	Hydro RG	25,93	3,58				
19/01/2021 09:30	Point J	20,97	2,57		8,06	287	5
19/01/2021 09:40	Point F	12,43	2,50		8	231	5
19/01/2021 21:30	Hydro RD	5,54	1,76				
19/01/2021 21:30	Hydro RG	22,48	3,43				
20/01/2021 09:20	Point C	3,21	2,07		8,13	263	5
20/01/2021 09:30	Hydro RD	3,94	1,69				
20/01/2021 09:30	Hydro RG	20,63	3,34				
20/01/2021 09:30	Point J	18,59	2,44		8,15	263	5
20/01/2021 09:40	Point F	2,13	2,02		8,07	237	5
20/01/2021 21:30	Hydro RD	2,51	1,62				
20/01/2021 21:30	Hydro RG	7,38	2,80				
21/01/2021 09:20	Point C	11,02	2,46		8,16	232	6
21/01/2021 09:30	Hydro RD	12,60	2,12				
21/01/2021 09:30	Hydro RG	7,96	3,24				
21/01/2021 09:30	Point F	8,37	2,32		8,08	249	6
21/01/2021 09:40	Point J	3,82	1,69		8,06	224	6
21/01/2021 21:30	Hydro RD	3,52	1,67				
21/01/2021 21:30	Hydro RG			2,91			
22/01/2021 09:20	Point C	5,35	2,17		8,06	234	6,5
22/01/2021 09:30	Hydro RD	7,48	1,86				
22/01/2021 09:30	Hydro RG			1,48			
22/01/2021 09:30	Point F	4,00	2,12		7,97	247	6
22/01/2021 09:40	Point J			1,90	7,91	230	6
22/01/2021 21:30	Hydro RD	3,03	1,64				
22/01/2021 21:30	Hydro RG			2,51			
23/01/2021 09:20	Point C			1,91	8,04	241	6,5
23/01/2021 09:30	Hydro RD	1,74	1,58				
23/01/2021 09:30	Hydro RG			1,47			
23/01/2021 09:30	Point F			1,92	7,99	256	6
23/01/2021 09:40	Point J			1,90	7,91	230	6

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
23/01/2021 21:30	Hydro RD	2,20	1,60				
23/01/2021 21:30	Hydro RG			2,52			
24/01/2021 09:20	Point C	3,49	2,09		8,08	253	5,5
24/01/2021 09:30	Hydro RD	3,37	1,66				
24/01/2021 09:30	Hydro RG	2,02	1,60				
24/01/2021 09:30	Point F			1,91	7,94	258	5,5
24/01/2021 09:40	Point J			1,94	7,88	208	6
24/01/2021 21:30	Hydro RD	4,00	2,62				
24/01/2021 21:30	Hydro RG	3,75	2,64				
25/01/2021 09:20	Point C	9,13	2,79		7,63	264	5
25/01/2021 09:30	Hydro RD	8,47	1,93				
25/01/2021 09:30	Hydro RG			2,64			
25/01/2021 09:30	Point F	4,05	2,63		7,71	261	5
25/01/2021 09:40	Point J			2,64	7,75	197,2	5,5
25/01/2021 21:30	Hydro RD	11,69	4,01				
25/01/2021 21:30	Hydro RG			2,65			
26/01/2021 09:20	Point C	3,17	2,58		8,04	267	4,5
26/01/2021 09:30	Hydro RD	4,07	1,74				
26/01/2021 09:30	Point F			2,47	8,01	268	4,5
26/01/2021 09:40	Point J			2,66	7,88	198,6	5
26/01/2021 09:55	Hydro RG			1,57			
26/01/2021 21:30	Hydro RD	3,09	1,70				
26/01/2021 21:30	Hydro RG			2,63			
27/01/2021 09:20	Point C	6,40	2,71		8	247	5
27/01/2021 09:30	Hydro RD	4,56	2,01				
27/01/2021 09:30	Hydro RG			2,63			
27/01/2021 09:30	Point F	6,54	2,84		8,01	259	5
27/01/2021 09:40	Point J			2,62	7,91	210	5
27/01/2021 21:30	Hydro RD	2,71	1,71				
27/01/2021 21:30	Hydro RG			2,62			
28/01/2021 09:20	Point C	5,69	2,70		8,01	234	6,5
28/01/2021 09:30	Hydro RD	4,20	1,76				
28/01/2021 09:30	Hydro RG			2,63			
28/01/2021 09:30	Point F	5,78	2,82		7,97	247	6,5

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
28/01/2021 09:40	Point J			2,60	7,95	220	7
28/01/2021 21:30	Hydro RD			1,54			
28/01/2021 21:30	Hydro RG	17,28	3,25				
29/01/2021 09:20	Point C			2,46	8,07	245	6,9
29/01/2021 09:25	Point F	3,19	2,73		8,02	257	7,5
29/01/2021 09:30	Hydro RD			1,54			
29/01/2021 09:30	Hydro RG	21,01	3,41				
29/01/2021 09:35	Point J	16,76	3,22		7,87	220	7,3
29/01/2021 21:30	Hydro RD	2,72	1,70				
29/01/2021 21:30	Hydro RG	21,08	2,58				
30/01/2021 09:20	Point C	4,26	2,65		8,15	257	8,1
30/01/2021 09:30	Hydro RD	3,09	1,70				
30/01/2021 09:30	Hydro RG	7,05	1,90				
30/01/2021 09:30	Point F			2,60	8,06	244	8,1
30/01/2021 09:35	Point J			2,62	7,94	180,5	8
30/01/2021 09:45	Point L	2,25	1,69		7,84	178	8,1
30/01/2021 21:30	Hydro RD	4,03	1,75				
30/01/2021 21:30	Hydro RG			1,57			
31/01/2021 09:20	Point C	2,72	2,60		8	261	8,3
31/01/2021 09:25	Point F			2,60	7,94	247	8,7
31/01/2021 09:30	Hydro RD	4,02	1,73				
31/01/2021 09:30	Hydro RG	1,93	1,71				
31/01/2021 09:30	Point J			2,66	7,82	186,6	9,1
31/01/2021 09:40	Point L			1,58	7,8	178,2	9,1
31/01/2021 21:30	Hydro RD			2,53			
31/01/2021 21:30	Hydro RG			2,61			
01/02/2021 09:20	Point C			2,55	7,78	257	9
01/02/2021 09:30	Hydro RD			2,47			
01/02/2021 09:30	Hydro RG	3,11	2,68				
01/02/2021 09:30	Point F			2,59	7,72	233	9
01/02/2021 09:40	Point J			2,55	7,67	174,2	9,5
01/02/2021 09:45	Point L	3,27	2,69				
01/02/2021 21:30	Hydro RD			2,48			
02/02/2021 09:20	Point C			2,55	7,97	252	9,5

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
02/02/2021 09:30	Hydro RD			2,46			
02/02/2021 09:30	Point F			2,57	7,86	231	10
02/02/2021 09:40	Point J	1,50	1,21		7,78	173,2	10
02/02/2021 09:50	Point L			2,54	7,86	173,6	10
02/02/2021 21:30	Hydro RD			2,50			
03/02/2021 09:20	Point C			2,59	7,94	231	10
03/02/2021 09:30	Hydro RD			2,49			
03/02/2021 09:30	Point F			2,60	7,83	210	10
03/02/2021 09:40	Point J			2,55	7,68	166	10
03/02/2021 09:45	Point L			2,56	7,69	164,2	10
04/02/2021 09:20	Point C			2,58	7,94	224	9,5
04/02/2021 09:30	Point F			2,62	7,78	192,2	9,5
04/02/2021 09:40	Point J			1,74	7,62	151,9	9,5
04/02/2021 09:50	Point L			2,58	7,66	151,7	10
04/02/2021 10:00	Point A			2,59	7,88	227	9,5
05/02/2021 09:15	Point A	6,46	2,85		7,88	228	9,5
05/02/2021 09:25	Point C	5,76	2,81		7,85	226	9,5
05/02/2021 09:30	Point F	3,79	2,77		7,74	193,1	10
05/02/2021 09:40	Point J			2,63	7,65	153,2	10
05/02/2021 09:45	Point L			2,55	7,62	151,1	10
06/02/2021 09:15	Point A			2,59	7,93	220	9
06/02/2021 09:20	Point C			2,57	7,91	223	9,5
06/02/2021 09:30	Point F			2,61	7,84	212	9,5
06/02/2021 09:35	Point J	4,36	2,73		7,65	170,5	9,5
06/02/2021 09:40	Point L			2,55	7,57	163,8	9,5
07/02/2021 09:15	Point A			2,58	7,89	215	8,5
07/02/2021 09:20	Point C			2,58	7,87	222	8,5
07/02/2021 09:30	Point F			2,60	7,82	225	8,5
07/02/2021 09:35	Point J			2,53	7,68	193,8	8,5
07/02/2021 09:45	Point L			2,53	7,72	185,6	8,5
08/02/2021 09:15	Point A			1,70	7,95	218	8
08/02/2021 09:25	Point C			1,69	7,91	222	7,5
08/02/2021 09:30	Point F			2,36	7,8	230	8
08/02/2021 09:40	Point J			2,38	7,75	201	8

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
08/02/2021 09:50	Point L			2,36	7,69	196,7	8
09/02/2021 09:10	Point A	3,01	2,49		7,99	229	7
09/02/2021 09:20	Point C			1,68	8,03	236	7
09/02/2021 09:25	Point F			2,36	7,89	237	6,5
09/02/2021 09:35	Point J			2,38	7,82	192,4	7
09/02/2021 09:45	Point L			2,38	7,76	189,5	7
10/02/2021 09:15	Point A	4,24	2,52		8,03	239	6
10/02/2021 09:25	Point C			1,68	8	243	6
10/02/2021 09:35	Point F	5,54	2,58		7,86	249	6
10/02/2021 09:40	Point J	3,30	2,50		7,81	199,2	6,5
10/02/2021 09:50	Point L			2,36	7,78	193,1	6,5
11/02/2021 09:15	Point A	6,76	2,78		8,04	240	4,5
11/02/2021 09:25	Point C	8,04	2,04		8	248	4,5
11/02/2021 09:35	Point F	8,74	2,72		7,94	255	4,6
11/02/2021 09:45	Point J	2,74	2,46		7,89	209	4,5
11/02/2021 09:50	Point L	4,57	2,54		7,78	195,9	5
12/02/2021 09:15	Point A	10,10	2,14		8,14	246	4,5
12/02/2021 09:20	Point C	11,15	2,19		8	253	4,5
12/02/2021 09:30	Point F	8,60	2,71		7,96	254	4,5
12/02/2021 09:40	Point J	3,75	2,54		7,85	199,4	5
12/02/2021 09:50	Point L			2,51	7,78	195,1	5
13/02/2021 09:15	Point A	3,85	2,50		8	250	3,5
13/02/2021 09:20	Point C	4,94	1,90		7,95	258	3,5
13/02/2021 09:30	Point F	6,99	2,61		7,94	264	3,5
13/02/2021 09:40	Point J	7,01	2,61		7,92	209	4
13/02/2021 09:50	Point L	7,03	2,78		7,85	204	4,5
14/02/2021 09:10	Point A			2,31	8,06	250	3
14/02/2021 09:20	Point C			1,68	8,01	258	3,5
14/02/2021 09:30	Point F			2,34	7,99	259	3,5
14/02/2021 09:40	Point J			2,33	7,93	194,1	4,5
14/02/2021 09:45	Point L	6,10	2,75		7,85	188,5	5
15/02/2021 09:25	Point A			2,49	7,9	252	4
15/02/2021 09:30	Point C			2,54	7,85	259	4
15/02/2021 09:35	Point F	4,90	2,74		7,88	270	4

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
15/02/2021 09:45	Point J	3,38	2,69		7,77	213	5,5
15/02/2021 09:50	Point L			3,42	7,72	205	5,5
16/02/2021 09:10	Point A			2,47	7,96	259	4,5
16/02/2021 09:20	Point C			2,53	7,97	269	4,5
16/02/2021 09:30	Point F			1,77	7,97	284	5
16/02/2021 09:35	Point J	5,97	2,76		7,89	232	6
16/02/2021 09:45	Point L			3,30	7,79	220	6
17/02/2021 09:10	Point A	11,87	2,90		8,12	269	6
17/02/2021 09:20	Point C	13,86	3,01		8	277	6
17/02/2021 09:25	Point F	7,22	2,78		8	295	6
17/02/2021 09:30	Point J	4,15	2,70		7,89	239	7
17/02/2021 09:40	Point L			3,32	7,89	229	7
18/02/2021 09:10	Point A	4,59	2,64		8,05	263	7
18/02/2021 09:20	Point C	5,27	2,70		8,05	272	7
18/02/2021 09:25	Point F	3,67	2,66		8,03	293	7
18/02/2021 09:35	Point J	2,98	2,66		7,93	249	8
18/02/2021 09:40	Point L			3,29	7,84	235	8
19/02/2021 09:20	Point A			2,45	8,02	271	7
19/02/2021 09:25	Point C			2,50	8,01	278	7
19/02/2021 09:35	Point F			2,51	8,01	303	7
19/02/2021 09:45	Point J			2,51	7,85	258	8
19/02/2021 09:50	Point L			3,30	7,79	249	8
20/02/2021 09:15	Point A			2,45	7,98	270	8
20/02/2021 09:20	Point C			2,50	7,97	280	8
20/02/2021 09:25	Point F			2,50	7,98	303	8,5
20/02/2021 09:35	Point J			3,40	7,85	267	9
20/02/2021 09:40	Point L			3,29	7,78	257	9
21/02/2021 09:15	Point A	3,60	2,60		7,98	275	9
21/02/2021 09:20	Point C	5,61	2,70		8	281	9
21/02/2021 09:25	Point F	10,92	2,89		8,01	304	9
21/02/2021 09:35	Point J	5,65	2,72		7,89	265	9,5
21/02/2021 09:40	Point L			3,30	7,83	256	9,5
22/02/2021 09:15	Point A	4,52	2,48		8,01	269	9
22/02/2021 09:20	Point C	9,52	3,03		8,02	279	9

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
22/02/2021 09:30	Point F	18,02	3,37		8,04	298	9
22/02/2021 09:40	Point J	12,90	3,37		7,93	270	10
22/02/2021 09:45	Point L	11,38	3,31		7,92	260	10
23/02/2021 09:05	Point A	7,04	2,55		8,02	274	9,5
23/02/2021 09:15	Point C	5,27	2,86		8,02	274	9,5
23/02/2021 09:20	Point F	6,38	2,92		8,03	297	9,5
23/02/2021 09:30	Point J	7,28	3,14		7,96	291	10
23/02/2021 09:40	Point L	10,08	3,25		7,92	274	10
24/02/2021 09:10	Point A			2,28	8,04	269	10,5
24/02/2021 09:20	Point C			2,64	8,06	276	10,5
24/02/2021 09:30	Point F	8,68	2,99		8,07	300	10,5
24/02/2021 09:40	Point J	10,12	3,26		7,97	275	10,5
24/02/2021 09:45	Point L	10,78	2,25		7,98	264	10,5
25/02/2021 09:05	Point A			2,28	8,04	267	10,5
25/02/2021 09:15	Point C			2,64	8,05	271	10,5
25/02/2021 09:25	Point F			2,30	8,06	294	10,5
25/02/2021 09:30	Point J	7,54	3,15		7,94	279	10,5
25/02/2021 09:40	Point L	9,95	2,82		7,92	264	10,5
26/02/2021 09:15	Point A			2,29	8,04	277	11
26/02/2021 09:20	Point C			2,63	8,01	281	11
26/02/2021 09:30	Point F	2,39	1,75		8,03	302	11
26/02/2021 09:35	Point J	7,13	3,13		7,96	299	11
26/02/2021 09:40	Point L	7,92	2,75		7,91	287	11
27/02/2021 09:10	Point A	6,71	2,54		7,97	283	10,5
27/02/2021 09:20	Point C	7,90	2,96		8,05	296	10
27/02/2021 09:25	Point F	14,90	2,84		8,03	306	10
27/02/2021 09:35	Point J	5,27	3,06		8,03	305	10
27/02/2021 09:40	Point L			2,46	7,96	290	10
28/02/2021 09:10	Point A	4,80	2,47		8,05	287	9,5
28/02/2021 09:15	Point C	7,82	2,95		8	291	9,5
28/02/2021 09:25	Point F	15,11	2,85		8,06	311	9
28/02/2021 09:35	Point J	4,04	3,01		7,96	294	9,5
28/02/2021 09:40	Point L			2,46	7,95	284	9
01/03/2021 09:10	Point L	2,84	2,54		7,98	323	9,1

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
01/03/2021 09:20	Point J	5,41	2,61		8,01	314	9,2
01/03/2021 09:25	Point F	20,57	3,19		8,13	333	9,1
01/03/2021 09:30	Point C	22,92	3,30		8,1	275	9,1
01/03/2021 09:35	Point A	20,97	3,22		8,11	296	9,2
02/03/2021 09:15	Point A	3,31	2,56		8,12	288	9
02/03/2021 09:25	Point C	5,13	2,60		8,1	291	9
02/03/2021 09:30	Point F	2,85	2,53		8,12	311	9,5
02/03/2021 09:40	Point J	2,25	1,79		8,08	327	9,5
02/03/2021 09:45	Point L	2,58	2,52		8,03	311	9,5
03/03/2021 09:05	Point A			2,41	8,12	293	10
03/03/2021 09:15	Point C	5,00	2,97		8,11	297	10
03/03/2021 09:20	Point F	8,74	2,74		8,13	315	10
03/03/2021 09:30	Point J	3,32	2,55		8,05	320	10
03/03/2021 09:35	Point L			2,40	8	306	10
04/03/2021 09:20	Point C	24,08	3,36		8,14	301	10
04/03/2021 09:30	Point F	25,60	3,44		8,13	319	10
04/03/2021 09:40	Point J	6,26	2,63		8,03	321	10
04/03/2021 09:50	Hydro RG	2,69	2,54				
04/03/2021 10:15	Point A	20,35	3,19				
04/03/2021 21:30	Hydro RD	22,17	2,52				
04/03/2021 21:30	Hydro RG	3,48	2,56				
05/03/2021 09:10	Point J	3,35	2,55		8,1	319	9,9
05/03/2021 09:15	Point F	6,80	2,67		8,14	335	10
05/03/2021 09:25	Point C	6,86	2,66		8,15	316	9,9
05/03/2021 09:30	Hydro RD	9,71	1,89				
05/03/2021 09:30	Hydro RG			2,43			
05/03/2021 21:30	Hydro RD	4,11	1,64				
05/03/2021 21:30	Hydro RG			2,41			
06/03/2021 09:25	Point J	6,12	2,64		8,12	315	8,6
06/03/2021 09:30	Hydro RD	6,12	1,72				
06/03/2021 09:30	Hydro RG			2,41			
06/03/2021 09:30	Point F	19,96	3,18		8,15	344	8,5
06/03/2021 09:40	Point C	7,63	2,68		8,13	328	8,7
06/03/2021 21:30	Hydro RD	6,95	1,76				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
06/03/2021 21:30	Hydro RG	3,33	2,55				
07/03/2021 09:20	Point J	6,01	2,64		8,11	302	8,6
07/03/2021 09:25	Point F	18,71	3,12		8,13	349	8,7
07/03/2021 09:30	Hydro RD	4,55	1,82				
07/03/2021 09:30	Hydro RG			2,41			
07/03/2021 09:30	Point C	9,46	2,74		8,16	330	8,8
07/03/2021 21:30	Hydro RD	6,33	1,73				
07/03/2021 21:30	Hydro RG			1,45			
08/03/2021 09:15	Point C	17,12	2,26		8,12	319	8
08/03/2021 09:25	Point F	16,98	3,31		8,16	333	8
08/03/2021 09:30	Hydro RD	13,26	2,93				
08/03/2021 09:30	Hydro RG			5,01			
08/03/2021 09:30	Point J	4,77	2,88		8,06	300	8
08/03/2021 21:30	Hydro RD	7,16	2,71				
08/03/2021 21:30	Hydro RG			2,72			
09/03/2021 09:20	Point C	2,72	1,57		8,12	319	8
09/03/2021 09:30	Hydro RD			2,42			
09/03/2021 09:30	Hydro RG			2,69			
09/03/2021 09:30	Point F	1,81	1,55		8,16	333	8
09/03/2021 09:40	Point J			2,68	8,06	300	8
09/03/2021 21:30	Hydro RD			2,43			
09/03/2021 21:30	Hydro RG			2,67			
10/03/2021 09:20	Point C	1,94	1,54		8,2	315	7,5
10/03/2021 09:30	Hydro RD			2,42			
10/03/2021 09:30	Hydro RG			2,69			
10/03/2021 09:30	Point F	2,21	1,55		8,22	333	7,5
10/03/2021 09:35	Point J	1,76	1,75		8,11	325	8
10/03/2021 21:30	Hydro RD	9,87	2,78				
10/03/2021 21:30	Hydro RG			2,68			
11/03/2021 09:20	Point C	20,81	2,44		8,18	312	9
11/03/2021 09:30	Hydro RD	18,43	3,13				
11/03/2021 09:30	Hydro RG	5,48	2,88				
11/03/2021 09:30	Point F	29,43	2,90		8,19	325	9
11/03/2021 09:35	Point J	9,10	3,00		8,09	311	9,5

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
11/03/2021 21:30	Hydro RD	18,07	3,11				
11/03/2021 21:30	Hydro RG			2,67			
12/03/2021 09:25	Point C	17,06	2,25		8,21	320	9
12/03/2021 09:30	Hydro RD	15,96	3,03				
12/03/2021 09:30	Hydro RG	3,12	1,79				
12/03/2021 09:30	Point F	14,09	2,11		8,21	332	9
12/03/2021 09:35	Point J	5,69	2,87		8,05	309	9
12/03/2021 21:30	Hydro RD	2,73	2,55				
12/03/2021 21:30	Hydro RG			2,71			
13/03/2021 09:20	Point C	3,18	1,59		8,23	328	9,5
13/03/2021 09:30	Hydro RD	8,98	2,75				
13/03/2021 09:30	Hydro RG			2,70			
13/03/2021 09:30	Point F	2,71	1,58		8,22	339	9,5
13/03/2021 09:35	Point J			2,67	8,11	327	9,5
13/03/2021 21:30	Hydro RD			2,42			
13/03/2021 21:30	Hydro RG			2,70			
14/03/2021 09:20	Point C	1,60	1,53		8,23	331	9
14/03/2021 09:30	Hydro RD			2,45			
14/03/2021 09:30	Hydro RG	3,92	2,84				
14/03/2021 09:30	Point F	2,11	1,55		8,24	345	9
14/03/2021 09:35	Point J			1,68	8,14	343	9
14/03/2021 21:30	Hydro RD	3,30	2,54				
14/03/2021 21:30	Hydro RG	13,18	2,91				
15/03/2021 09:20	Point C	15,59	2,90		8,18	319	9,5
15/03/2021 09:30	Hydro RD	14,64	2,96				
15/03/2021 09:30	Hydro RG	17,49	3,11				
15/03/2021 09:30	Point F	17,27	2,92		8,23	332	9,5
15/03/2021 09:35	Point J	16,42	2,90		8,14	334	9,5
15/03/2021 21:30	Hydro RD	20,22	3,21				
15/03/2021 21:30	Hydro RG	22,41	3,33				
16/03/2021 09:20	Point C	6,55	2,54		8,2	318	9
16/03/2021 09:25	Point F	7,94	2,57		8,26	332	9,5
16/03/2021 09:30	Hydro RD	13,28	2,90				
16/03/2021 09:30	Hydro RG	17,53	3,11				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
16/03/2021 09:35	Point J	17,47	2,98		8,1	308	10
16/03/2021 21:30	Hydro RD	8,13	2,70				
16/03/2021 21:30	Hydro RG	21,50	3,28				
17/03/2021 09:20	Point C	11,93	2,72		8,19	322	9,5
17/03/2021 09:25	Point F	19,69	3,04		8,19	335	9,5
17/03/2021 09:30	Hydro RD	7,35	2,69				
17/03/2021 09:30	Hydro RG	19,53	3,20				
17/03/2021 09:35	Point J	19,63	3,06		8,07	315	10
17/03/2021 21:30	Hydro RD	11,60	2,85				
17/03/2021 21:30	Hydro RG	20,15	3,23				
18/03/2021 09:20	Point C	7,02	2,58		8,19	331	9
18/03/2021 09:25	Point F	9,06	2,62		8,22	342	9
18/03/2021 09:30	Hydro RD	7,33	2,68				
18/03/2021 09:30	Hydro RG	23,69	3,40				
18/03/2021 09:35	Point J	18,05	3,16		8,07	309	9
18/03/2021 21:30	Hydro RD	7,23	2,69				
18/03/2021 21:30	Hydro RG	8,08	2,74				
19/03/2021 09:20	Point C	3,77	1,67		8,28	337	9
19/03/2021 09:25	Point F			2,32	8,27	347	9
19/03/2021 09:30	Hydro RD	5,55	2,63				
19/03/2021 09:30	Hydro RG			2,44			
19/03/2021 09:35	Point J			2,45	8,12	306	9
19/03/2021 21:30	Hydro RG	2,39	1,79				
20/03/2021 09:20	Point C	4,94	2,47		8,32	338	8,5
20/03/2021 09:25	Point F	2,87	2,34		8,31	343	9
20/03/2021 09:30	Hydro RG			2,35			
20/03/2021 09:35	Point J			1,73	8,16	299	9
20/03/2021 10:00	Hydro RD	5,08	2,60				
20/03/2021 21:30	Hydro RD	3,36	1,77				
20/03/2021 21:30	Hydro RG	3,42	2,49				
21/03/2021 09:15	Point C			2,28	8,35	326	8,5
21/03/2021 09:25	Point F	4,40	2,53		8,32	336	8,5
21/03/2021 09:30	Hydro RD	3,52	2,57				
21/03/2021 09:30	Hydro RG	17,87	3,02				

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
21/03/2021 09:35	Point J	15,27	3,03		8,18	293	8,5
21/03/2021 21:30	Hydro RD	9,99	3,07				
21/03/2021 21:30	Hydro RG	19,57	3,50				
22/03/2021 09:25	Point J	19,12	3,19		8,16	324	8,3
22/03/2021 09:30	Hydro RD	16,30	2,99				
22/03/2021 09:30	Hydro RG	19,50	3,17				
22/03/2021 09:30	Point F	15,23	3,01		8,27	333	8,2
22/03/2021 09:40	Point C	18,16	3,36		8,25	316	8,1
22/03/2021 21:30	Hydro RD	20,49	3,16				
22/03/2021 21:30	Hydro RG	21,84	3,26				
23/03/2021 09:15	Point C	7,83	3,01		8,21	285	8
23/03/2021 09:25	Point F	5,61	2,66		8,23	298	8
23/03/2021 09:30	Hydro RD	12,77	2,85				
23/03/2021 09:30	Hydro RG	20,15	3,18				
23/03/2021 09:35	Point J	14,94	3,02		8,12	306	8,5
23/03/2021 21:30	Hydro RD	5,01	2,57				
23/03/2021 21:30	Hydro RG	17,27	3,06				
24/03/2021 09:20	Point C	5,36	2,95		8,2	271	9
24/03/2021 09:25	Point F	20,92	3,26		8,26	287	9
24/03/2021 09:30	Hydro RD	4,31	2,56				
24/03/2021 09:30	Hydro RG	16,37	3,02				
24/03/2021 09:35	Point J	19,73	3,21		8,15	302	9,5
24/03/2021 21:30	Hydro RD	3,17	2,58				
24/03/2021 21:30	Hydro RG	13,21	2,90				
25/03/2021 09:15	Point C			2,74	8,19	273	10
25/03/2021 09:25	Point F	6,02	2,69		8,24	287	10
25/03/2021 09:30	Hydro RD			2,46			
25/03/2021 09:30	Hydro RG	12,72	2,89				
25/03/2021 09:35	Point J	9,76	2,82		8,15	290	10,5
25/03/2021 21:30	Hydro RD			2,46			
25/03/2021 21:30	Hydro RG	7,68	2,71				
26/03/2021 09:15	Point J	12,46	2,92		8,25	291	10,7
26/03/2021 09:25	Point F			2,45	8,24	305	10,7
26/03/2021 09:30	Hydro RD			2,46			

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
26/03/2021 09:30	Hydro RG	13,19	2,90				
26/03/2021 09:30	Point C			2,74	8,18	291	10,7
26/03/2021 21:30	Hydro RD			2,45			
26/03/2021 21:30	Hydro RG	17,10	3,05				
27/03/2021 09:10	Point J	8,71	2,78		8,36	309	10,4
27/03/2021 09:20	Point F			2,73	8,41	319	10,3
27/03/2021 09:30	Hydro RD			2,45			
27/03/2021 09:30	Hydro RG	13,66	2,92				
27/03/2021 09:30	Point C			2,73	8,35	306	10,4
27/03/2021 21:30	Hydro RD			2,45			
27/03/2021 21:30	Hydro RG	14,80	2,94				
28/03/2021 09:20	Point J	14,09	2,96		8,28	324	10
28/03/2021 09:30	Hydro RD			2,45			
28/03/2021 09:30	Hydro RG	19,04	3,12				
28/03/2021 09:30	Point F			2,73	8,29	323	10,1
28/03/2021 09:35	Point C	3,91	2,87		8,26	310	10,1
28/03/2021 21:30	Hydro RD	2,76	2,51				
28/03/2021 21:30	Hydro RG	17,30	3,06				
29/03/2021 09:20	Point C	7,61	2,56		8,38	303	11
29/03/2021 09:30	Hydro RD	5,29	2,83				
29/03/2021 09:30	Hydro RG	21,20	3,44				
29/03/2021 09:30	Point F	17,31	2,93		8,38	309	11
29/03/2021 09:35	Point J	24,27	3,23		8,26	312	10,5
29/03/2021 21:30	Hydro RD	4,74	2,82				
29/03/2021 21:30	Hydro RG	18,83	3,35				
30/03/2021 09:20	Point C	5,99	2,50		8,23	297	12
30/03/2021 09:25	Point F	16,27	2,88		8,25	309	12
30/03/2021 09:30	Hydro RD	4,18	2,79				
30/03/2021 09:30	Hydro RG	19,32	3,37				
30/03/2021 09:35	Point J	22,95	3,18		8,17	323	12
30/03/2021 21:30	Hydro RD			2,63			
30/03/2021 21:30	Hydro RG	12,48	3,10				
31/03/2021 09:15	Point J	4,38	2,45		8,16	338	13,2
31/03/2021 09:20	Point F			2,28	8,29	318	13,6

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
31/03/2021 09:30	Hydro RD			2,62			
31/03/2021 09:30	Hydro RG	4,53	2,81				
31/03/2021 09:30	Point C			2,28	8,37	305	13,5
31/03/2021 21:30	Hydro RD			2,63			
31/03/2021 21:30	Hydro RG			2,64			
01/04/2021 09:20	Point C	3,23	2,41		8,3	302	14
01/04/2021 09:25	Point F			2,27	8,29	314	14
01/04/2021 09:30	Hydro RD			2,61			
01/04/2021 09:30	Hydro RG	6,22	2,55				
01/04/2021 09:35	Point J			2,65	8,19	340	13,5
01/04/2021 21:30	Hydro RD			2,63			
01/04/2021 21:30	Hydro RG			2,37			
02/04/2021 09:15	Point C			2,28	8,4	309	15
02/04/2021 09:25	Point F			2,26	8,45	323	15
02/04/2021 09:30	Hydro RD			2,63			
02/04/2021 09:30	Hydro RG	3,53	2,46				
02/04/2021 09:35	Point J			2,29	8,29	331	14,5
02/04/2021 21:30	Hydro RD			2,62			
02/04/2021 21:30	Hydro RG	3,70	2,47				
03/04/2021 09:15	Point C			2,27	8,45	317	13
03/04/2021 09:20	Point F			2,27	8,44	330	13
03/04/2021 09:30	Hydro RD			2,62			
03/04/2021 09:30	Hydro RG	2,98	2,44				
03/04/2021 09:30	Point J			2,29	8,32	329	12,5
03/04/2021 21:30	Hydro RD			2,62			
03/04/2021 21:30	Hydro RG	3,49	2,48				
04/04/2021 09:15	Point C			2,27	8,49	321	12
04/04/2021 09:20	Point F			2,27	8,49	330	12
04/04/2021 09:30	Hydro RD			2,62			
04/04/2021 09:30	Hydro RG	3,67	2,47				
04/04/2021 09:30	Point J			2,65	8,28	336	12
04/04/2021 21:30	Hydro RD			2,29			
04/04/2021 21:30	Hydro RG	3,26	2,45				
05/04/2021 09:15	Point C	6,16	2,10		8,51	324	12

Date / heure de prélèvement	Point de prélèvement	Concentration en tritium (Bq/L)	Incertitude (Bq/L)	< SD (Bq/L)	pH	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
05/04/2021 09:20	Point F	8,23	2,62		8,52	336	12
05/04/2021 09:30	Hydro RD	5,74	2,86				
05/04/2021 09:30	Hydro RG			1,82			
05/04/2021 09:30	Point J	4,71	2,51		8,4	349	12
05/04/2021 21:30	Hydro RD	32,05	3,92				
05/04/2021 21:30	Hydro RG	7,81	2,21				
06/04/2021 09:15	Point C	43,26	4,29		8,44	324	11
06/04/2021 09:25	Point F	39,45	4,08		8,45	337	11
06/04/2021 09:30	Hydro RD	45,50	4,61				
06/04/2021 09:30	Hydro RG	10,29	2,32				
06/04/2021 09:35	Point J	17,87	3,02		8,33	353	11,5
06/04/2021 21:30	Hydro RD	35,68	4,10				
06/04/2021 21:30	Hydro RG	15,97	2,60				
07/04/2021 09:15	Point C	23,92	3,29		8,48	333	10
07/04/2021 09:20	Point F	22,92	3,23		8,51	343	10
07/04/2021 09:30	Hydro RD	26,62	3,70				
07/04/2021 09:30	Hydro RG	18,35	2,74				
07/04/2021 09:30	Point J	20,55	3,15		8,42	358	10,5
07/04/2021 21:30	Hydro RD	25,62	3,10				
07/04/2021 21:30	Hydro RG	20,26	2,82				
08/04/2021 09:15	Point C	31,84	3,69		8,54	335	10,5
08/04/2021 09:20	Point F	30,86	3,63		8,58	346	10,5
08/04/2021 09:30	Hydro RD	29,00	3,28				
08/04/2021 09:30	Hydro RG	19,67	2,78				
08/04/2021 09:30	Point J	23,76	3,32		8,44	356	11,5

Représentation graphique

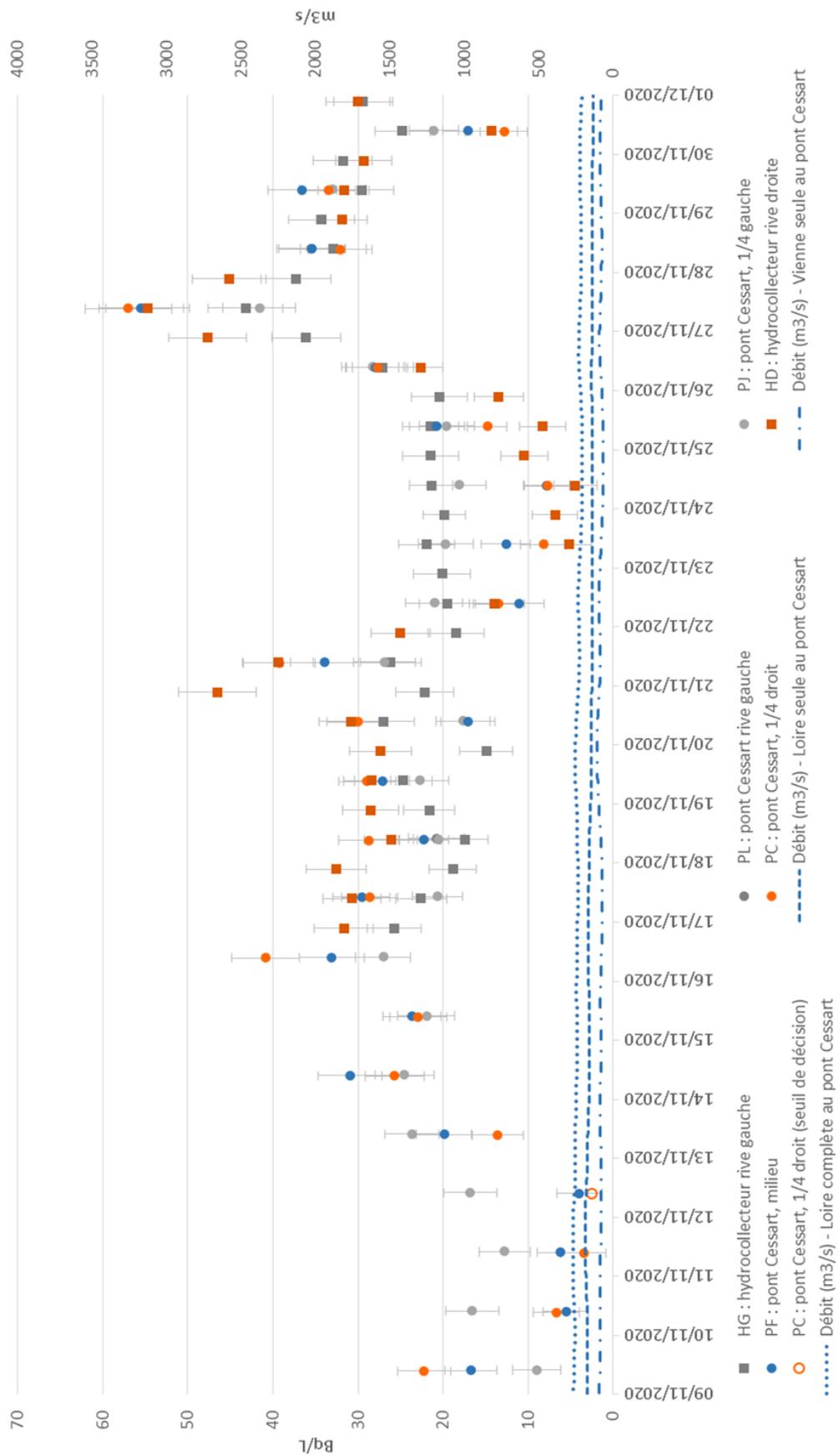


Figure 108 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 9 et le 30 novembre 2020

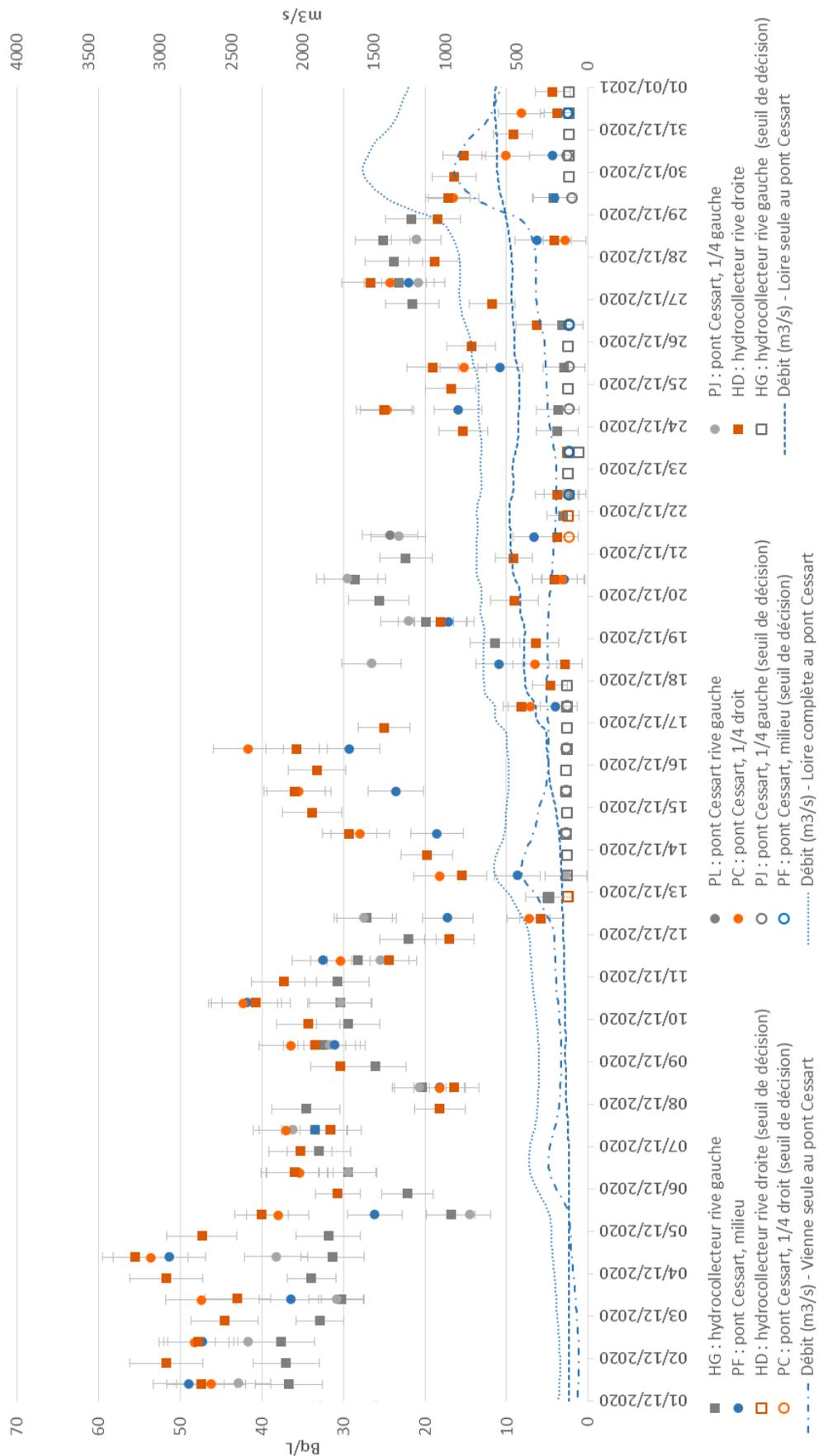


Figure 109 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 1er et le 31 décembre 2020

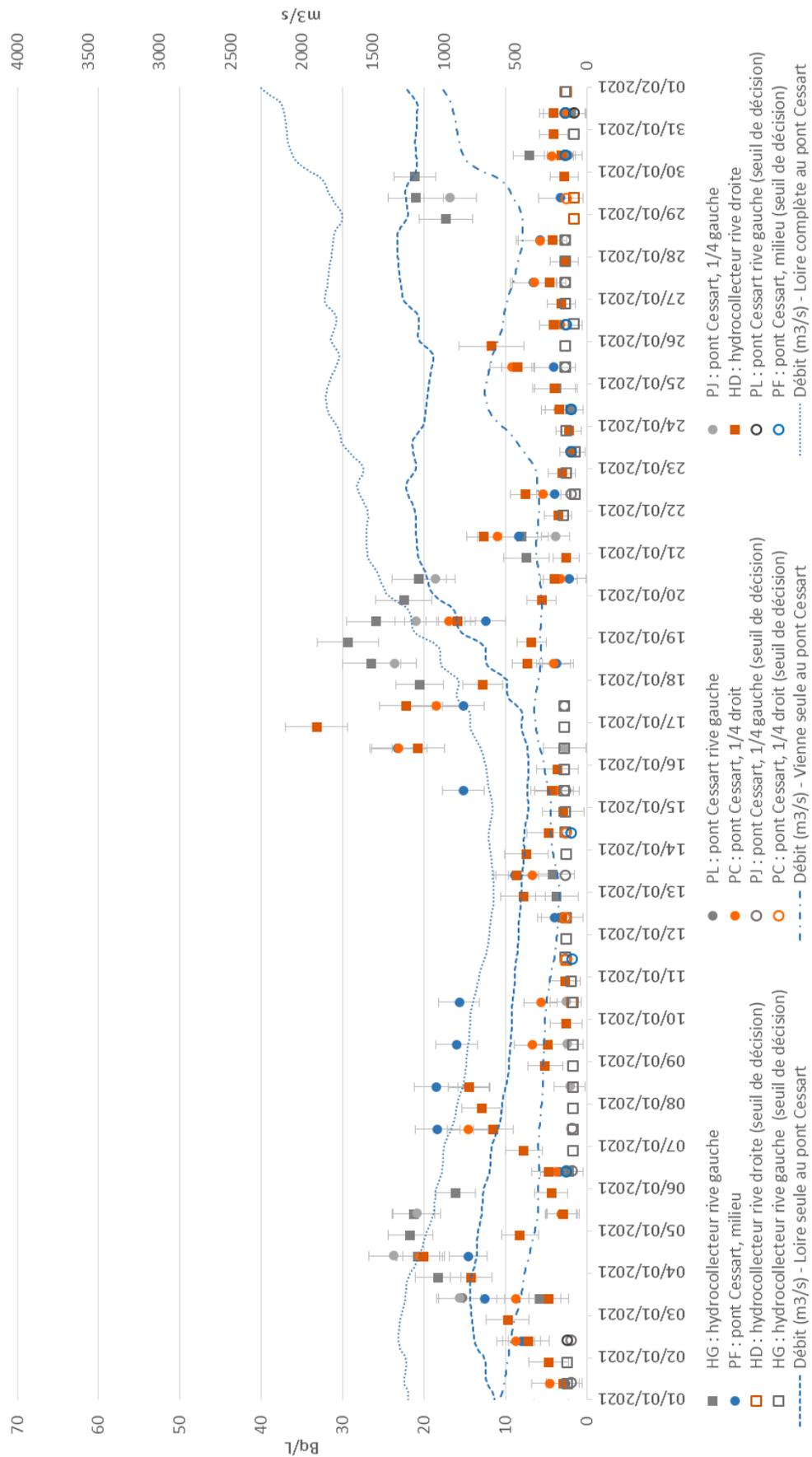


Figure 110 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 1er et le 31 janvier 2021

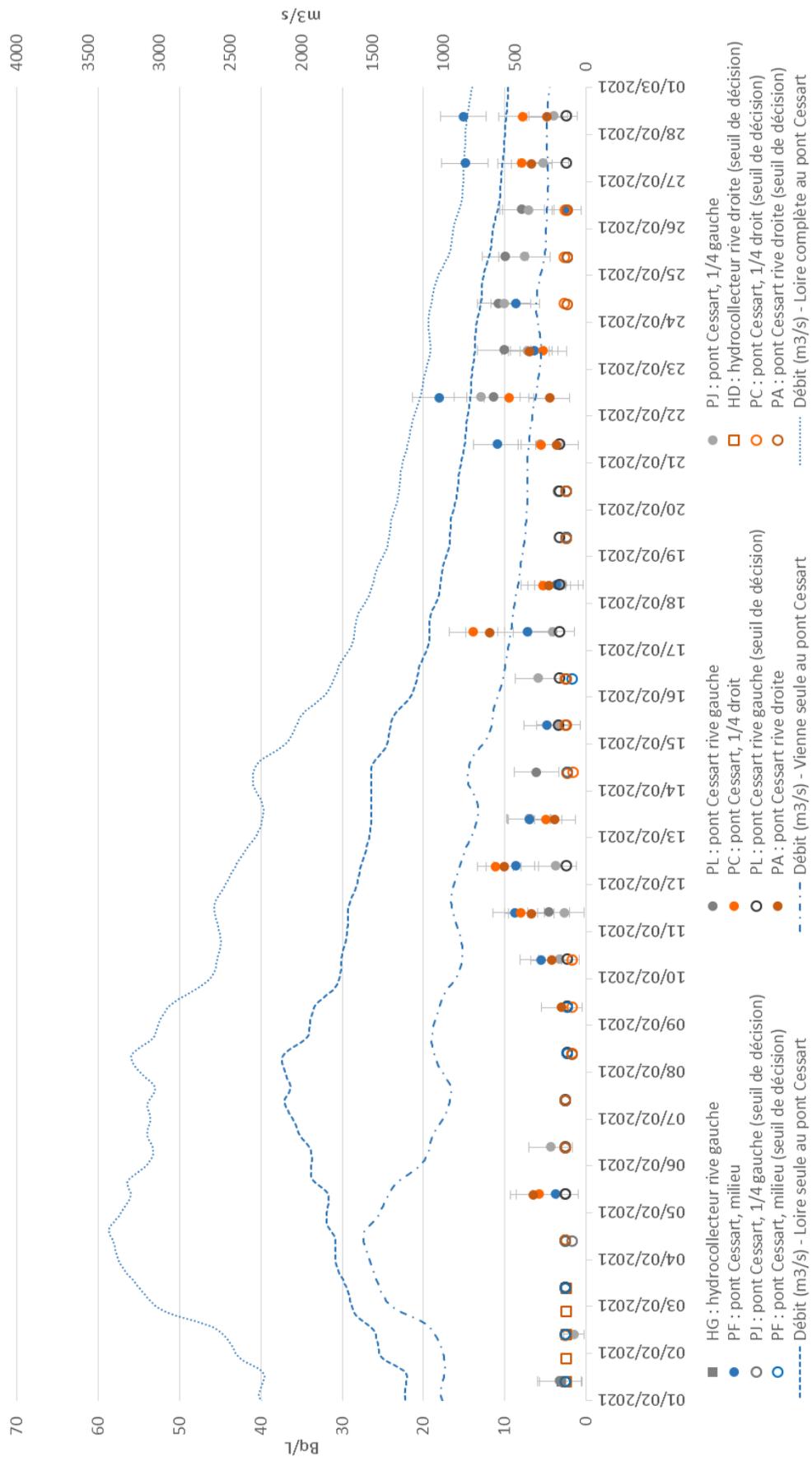


Figure 111 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 1er et le 28 février 2021

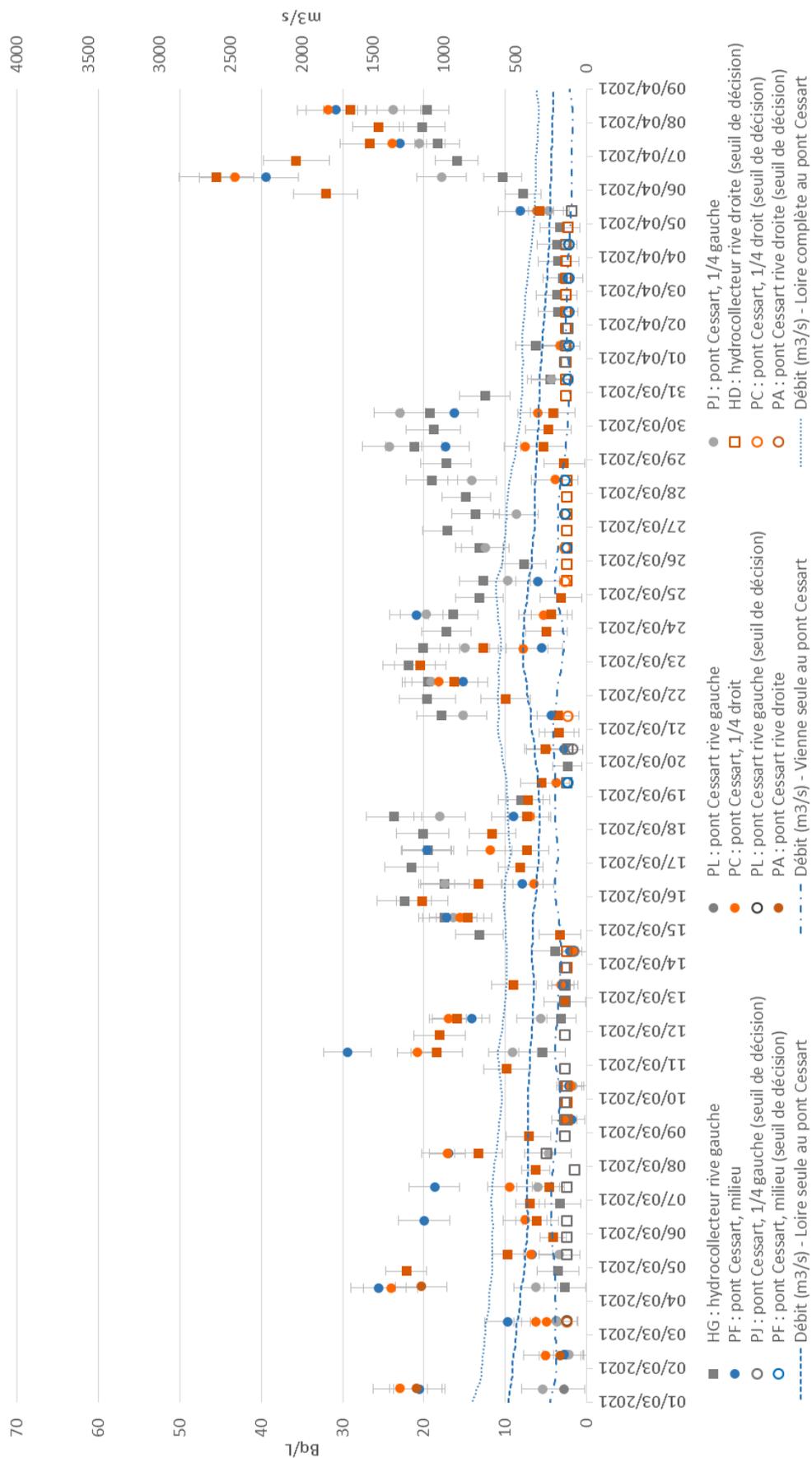


Figure 112 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 1^{er} mars et le 8 avril 2021

10.7 PARTICIPANTS AU COMITE DE SUIVI

ACRO	BARBEY Pierre BOILLEY David	JOSSET Mylène LE VOT Aurore
ANCCLI	AMIARD Jean-Claude	PINEAU Coralie
ASN	BAGLAN Nicolas FAYOLLE Corinne FOURNIER Marc GUANNEL Yves HOULE Alexandre PEREIRA MARQUES Guillaume	PLANCQUE Gabriel REYNAL Nathalie RIVIERE Olivier RON Christian TERLISKA Yoann
Cli de Chinon	BOIGARD Fabrice BOULAY Leny BOUTIN Dominique FISCHER Jean Pierre FISZBIN Michel	HOYAU Pascal MADINIER Michel REMMERIE Bernard TERY VERBE Alix
Membre de la Cli de Civaux	TERRACHER Jacques	
EDF	BESNARD Amélie BOULETREAULT Didier BRETECHE Nathalie BRISPIERRE Jérôme DELIASSUS Gontrand GUIHOT Pascal GUILLOUX Luc	LELOUP Laurent HEMIDY Pierre-Yves HOERTH Jean Marc PIERRE Marine TINDILLERE Michel THIELIN POIRAUD Nadine
Mairie de Saumur (Communauté d'agglomération Saumur Val-de-Loire)	NERON Noël	
Réseau Loire Alerte	DUCAM Lucile	
IRSN	BAUDRY Michel BEGUIN LEPRIEUR Magali BESNUS François BOYER Patrick COGEZ Eric DESCHAMPS Céline GALLIEZ Kevin GLEIZES Marc	LEBEAU LIVE Audrey LORTHIOIR Stéphane MONTI Pascale MORIN Maxime MOURLON Christophe PERTUISOT Marie-Hélène PIAR Libuse YAVASSAS Christina

NB : Les personnes recensées ici ont participé à au moins une réunion du Comité de suivi de l'étude sur le tritium dans la Loire.

10.8 COMMENTAIRES DES PARTICIPANTS AU COMITE DE SUIVI

NOTA

Les commentaires reproduits dans cette annexe ont été transmis à l'IRSN par les participants au comité de suivi de l'étude.

Chaque point de vue exposé reflète donc les positions de son auteur et n'engage pas l'IRSN ou les autres membres.

J. Terracher (membre de la CLI de Civaux)

EXTRAITS et COMMENTAIRES, par Jacques Terracher, le 03/01/22

p. 13 : Le 21 janvier 2019, une concentration de 310 Bq/L de tritium a été relevée dans la Loire à Saumur ». La mesure de 310 Bq/l n'étant pas contestée, on peut la considérer comme certaine.

p. 14 : « Le prélèvement de janvier 2019 a été réalisé depuis le milieu du pont Cessart, Le milieu du pont exclut le panache du CNPE de Civaux.

p. 15 : Ce rapport présente notamment de nouvelles mesures effectuées au niveau du pont Cessart à Saumur en 2020 (Figure 8) qui mettent en évidence **un gradient de la concentration en tritium suivant le transect du pont**. Le rapport indique que « [...] selon les prélèvements, des maxima de concentrations peuvent être retrouvés sur la rive gauche ou la rive droite. Ce constat montre **que le mauvais mélange n'est pas exceptionnel à Saumur** ».

Ce constat pose un problème vis à vis des ARPES qui postulent que le bon mélange est établi 1 km après les rejets des centrales. Cela remet en cause leur validité : la protection de l'environnement n'est pas garantie dans ces conditions. De plus, nul ne sait où se situe la zone de bon mélange de chaque CNPE de la Loire, et de Chinon en particulier. Cette méconnaissance porte atteinte au code l'environnement car les mauvais mélanges sont synonymes de gradients de pollutions au sein des panaches et de concentrations excessives.

p. 16 : l'ASN indique « avoir mené, le 21 juin 2019, une inspection de la centrale nucléaire de Chinon...**Lors de cette inspection, aucune anomalie importante susceptible d'être à l'origine d'un rejet non maîtrisé n'a été détectée.** [...] L'ASN a également analysé une nouvelle fois les registres réglementaires remis par EDF ; **elle n'a relevé aucune anomalie concernant les modalités de rejets des centrales concernées sur la période considérée. Les calculs de dilution font état d'une concentration moyenne de 60 à 80 Bq/L en aval de la confluence Vienne/Loire le 21 janvier 2019** ».

D'après cette enquête de l'ASN : **aucun CNPE n'est responsable de la concentration de 310 Bq/l à Saumur**

p. 17 : l'hypothèse d'une autre source de tritium que les CNPE du bassin de la Loire et de la Vienne n'a pas été retenue pour expliquer la mesure atypique du 21 janvier 2019. [...] **L'analyse des informations fournies concernant le prélèvement et la mesure n'a pas mis en évidence d'éléments susceptibles d'expliquer la mesure atypique du 21 janvier 2019.**

D'après cette analyse, **seules les CNPE peuvent être responsables des 310 Bq/l à Saumur**

Déduction des 2 déclarations précédentes : La mesure anormale de 310 Bq/l provient de rejets normaux d'un ou plusieurs CNPE ligériens.

p. 17 :

CONCLUSIONS DES INVESTIGATIONS PRELIMINAIRES

Sur la base des éléments recueillis et analysés par l'ASN et l'IRSN, **l'hypothèse la plus probable pour expliquer la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019 est celle d'une hétérogénéité des concentrations en tritium dans la Loire sur des longues distances, provenant d'un mélange imparfait des rejets du CNPE de Chinon dans le milieu**, du fait de conditions hydrauliques particulières. Cette hypothèse a fait l'objet d'une étude approfondie menée par l'IRSN dont le déroulement, les résultats et les conclusions sont présentés dans ce rapport .

Le mélange incomplet des rejets de Chinon serait la cause des 310 Bq/l : « **hypothèse la plus probable** ».

p. 20 : Débit d'activité maximal (Bq/s) : $80 \times \text{Débit Loire (en L/s)}$

La formule « $80 \times D$ » postule que l'activité volumique en tritium après mélange complet est de 80 Bq/l dans le fleuve. Raison pour laquelle D doit être exprimé en litres par seconde, pour être homogène avec les Bq par litre. Cette valeur de 80 Bq/l constitue la première limitation que doit respecter chaque rejet. Elle est définie dans les ARPE comme une moyenne sur 24 heures.

p. 33 : Les mauvais mélanges des affluents

Les photo thermiques satellites et aériennes ainsi que les relevés effectués au pont Cessart de Saumur montrent que les eaux des affluents de la Loire ne se mélangent pas immédiatement dans le fleuve. L'eau de la Vienne reste rive gauche de la Loire jusqu'à Saumur et aussi après.

Ce phénomène n'est pas une découverte, il aurait dû être pris en compte au moment d'accorder les autorisations de rejets.

p. 53 : Comme pour la campagne précédente, la SMP ne détecte que le bord gauche du panache où la concentration est inférieure d'un facteur 2 à la CBM attendue et équivalente aux contributions en provenance de l'amont du CNPE de Chinon. Le pic passe de l'autre côté de l'île.

Les mesures effectuées par la SMP de Chinon sont entachées d'une erreur systématique d'installation : elles ne permettent donc pas de contrôler les rejets avec fiabilité.

p. 97 : Les premières modélisations 1D avec la version autonome de CASTEUR effectuées sur la période de mai 2018 à mai 2019 ont montré que **la surveillance à la station de surveillance aval du CNPE de Chinon n'était pas toujours en mesure de détecter les rejets du CNPE de Chinon** (figure suivante).

Le CNPE de Chinon ne surveille pas toujours ses rejets avec exactitude.

p. 100 : Tous ces résultats laissent penser que le mélange des rejets de Chinon est incomplet au niveau de la SMP aval

p. 103 : L'analyse des résultats conduit à faire les constats suivants :

- **le mélange des rejets de Chinon n'est pas complet au niveau de la SMP aval.** Lors du passage des rejets de Chinon, les mesures peuvent être proches, inférieures ou supérieures à la prévision de la modélisation supposant leur mélange homogène ;
- **les mesures à la SMP aval ne permettent pas toujours de détecter les rejets de Chinon.** Lors du passage des rejets de Chinon, les mesures peuvent être bien inférieures aux prévisions de la modélisation (supposant leur mélange complet), proches de la contribution des seuls rejets des CNPE amont.

La concentration en tritium dans la Loire est inhomogène en amont de Chinon : celle en tritium en rive droite est supérieure d'environ un facteur deux à celle en rive gauche. Les rejets des CNPE amont pourraient n'être pas complètement mélangés à ce niveau mais surtout, plus vraisemblablement, **les prélèvements en rive gauche de la Loire pourraient avoir été réalisés dans des veines sous influence du Cher, dont les eaux sont a priori au niveau du bruit de fond en tritium.** En effet, le Cher afflue en rive gauche, à environ 25 km en amont, et ses eaux ne seraient pas complètement mélangées à la Loire au niveau du CNPE Chinon, restant préférentiellement côté rive gauche.

La SMP de Chinon « baigne » dans les eaux du Cher et de l'Indre , plus que dans les rejets de la centrale !

p. 108 :

CONCLUSIONS SUR LA REPRESENTATIVITE DES PRELEVEMENTS A LA SMP AVAL Compte tenu du positionnement du point de prélèvement, situé à 5 m de la rive gauche, qui le place plus ou moins en bordure gauche des panaches en fonction du débit de la Loire, les prélèvements à la SMP aval peuvent être représentatifs ou non des rejets du CNPE de Chinon :

- **pour des débits inférieurs à 100 m³ /s, les mesures mi-rejet à la SMP sont représentatives des rejets du CNPE de Chinon ;**
- **pour des débits supérieurs, les mesures à la SMP deviennent essentiellement représentatives des conditions amont et ne détectent pas ou très peu les rejets du CNPE.**

Cette situation existe depuis la création de la centrale, il y a 58 ans !

La Loire à Avoine d'après Wikipedia : « *Le débit mensuel moyen (calculé sur 34 ans pour cette station) varie de 142 m³/s au mois d'août à 753 m³/s au mois de février* ».

Les mesures de la SMP de CHINON sont donc presque toujours fausses, sauf en période d'étiage !

p. 110 : APPLICATION DE LA MODELISATION 1D A LA MESURE DU 21 JANVIER 2019

La concentration estimée le 21 janvier 2019 au pont Cessart par la modélisation 1D est au plus de 70 Bq/L, en lien avec les rejets de Chinon et de Belleville.

La modélisation 1D « *suppose une dilution latérale complète et instantanée des effluents* », ce qui n'est pas le cas en réalité. D'où un calcul entaché d'une erreur systématique.

p. 113 : APPLICATION DE LA MODELISATION 2D A LA MESURE DU 21 JANVIER 2019 Au niveau du pont Cessart à Saumur, considérant les rejets déclarés par l'exploitant conformément à la réglementation, la modélisation 2D **conduit à une concentration maximale en tritium dans la Loire le 21 janvier 2019 variant entre 80 Bq/L et environ 160 Bq/L** suivant les hypothèses prises pour le paramétrage hydrographique. Ces modélisations ne permettent pas, même dans des conditions majorantes, de retrouver le niveau de la mesure atypique à 310 Bq/L, même si le maximum de la concentration en tritium est bien localisé au centre du pont.

La modélisation 2D prend en compte une dilution progressive et paraît plus réaliste, mais n'explique toujours pas les 310 Bq/l.

p. 116 :

5.4 HYPOTHESE D'UNE ERREUR DE REJET

Dans l'hypothèse d'une erreur d'un facteur 2 (rejet d'un effluent de concentration en tritium de 7,2 MBq/L) sur la concentration de l'effluent rejeté, la modélisation montre que la concentration atypique de 310 Bq/L peut-être également approchée pour un facteur $\gamma = 0,2$.

En absence de toute autre explication, un rejet mal contrôlé pourrait expliquer les 310 Bq/l.

p. 118 et suivantes : L'ÉVÈNEMENT DE SEPTEMBRE 2020

Lundi 21 septembre : Obtention du résultat d'analyse de l'aliquote 24 h constituée du 20 septembre 9 h au 21 septembre 9 h à la SMP aval. **La concentration en tritium est mesurée à $151 \pm 20,6$ Bq/L** alors qu'une concentration ajoutée (tous CNPE confondus) d'environ 50 Bq/L est attendue [...]

- débit de la Loire : 61,4 m³/s.

En présence d'un débit de Loire aussi faible, la mesure de 151 Bq /l à la SMP est représentative du rejet du 21 sept 2020. Ce n'était pas le cas le 21 janvier 2019. L'erreur de rejet reste une hypothèse valable.

p. 122 : CONCLUSIONS SUR LA MODELISATION DE L'ÉVÈNEMENT DE SEPTEMBRE 2020 Cet incident souligne le rôle central de la SMP aval sans laquelle l'erreur de rejet n'aurait probablement pas été détectée. De fait, l'analyse de ce cas met en exergue **la nécessité d'étudier comment améliorer la capacité de la SMP à détecter les rejets du CNPE de Chinon en toutes circonstances**, en particulier en la rendant moins dépendante des différents régimes hydrauliques de la Loire afin de garantir notamment la détection d'éventuels rejets non maîtrisés du CNPE.

La nécessité impose surtout une réforme de l'installation actuelle pour y substituer un réseau de mesures qui permettrait un contrôle fiable des rejets de la centrale.

CONCLUSIONS

Les mesures réalisées (plus de 1000) au cours des 5 mois de cette étude, dont les niveaux ont varié entre le seuil de décision (2,3 Bq/L environ) et 57 Bq/L, n'ont pas mis en évidence de concentrations en tritium au pont Cessart à Saumur comparables à la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019.

La mesure de 310 Bq/l, pour atypique qu'elle soit, est surtout largement supérieure à la norme européenne de 100 Bq/l, **valeur paramétrique qu'on ne doit pas dépasser en situation normale**. En cas de dépassement, la directive européenne sur l'eau destinée à la consommation impose de :

- s'assurer que le dépassement ne met pas en danger les populations ;
- « *prendre des mesures pour rétablir la qualité des eaux* » ;
- mener une enquête pour connaître la cause du dépassement ;
- prendre « *des mesures qui règlent le problème à la source* ».

ENSEIGNEMENTS

Cette étude, fondée sur plus de 1000 mesures de concentrations de tritium dans la Loire réalisées sur une période de 5 mois (novembre 2020 à avril 2021) avec des conditions environnementales variées (débit, rejet, température...) et sur des modélisations (1D et 2D) de la dispersion du tritium rejeté entre Chinon et Saumur présentant un haut niveau de cohérence avec les mesures de terrain, **rend peu probable l'hypothèse qu'un mélange imparfait des rejets du CNPE de Chinon dans le milieu, sur de longues distances, ou qu'une stratification thermique des rejets, puisse expliquer la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019.**

CECI CONTREDIT FORMELLEMENT LA CONCLUSION DE LA PAGE 17

RECOMMANDATIONS

STATION MULTI-PARAMETRES (SMP) AVAL DU CNPE DE CHINON

6. L'IRSN recommande d'étudier comment la détection des rejets du CNPE de Chinon par la SMP aval de Chinon pourrait être rendue moins dépendante des différents régimes hydrauliques de la Loire (en envisageant par exemple la modification du point de prélèvement) et notamment garantir la détection d'éventuels rejets non maîtrisés du CNPE.

Recommandation très laxiste, puisque la SMP ne remplit pas sa fonction : elle devrait être entièrement réformée et reconstruite.

SYNTHESE DES REMARQUES

En dépit des efforts déployés pour mener l'enquête sur le tritium en Loire, il n'a pas été possible de déterminer le lieu d'où est parti le panache de tritium qui a été mesuré à 310 Bq/l à Saumur, ni ce qui peut provoquer de tels dépassement de la norme de 100 Bq/l. La mesure anormale de 310 Bq/l serait donc le résultat malchanceux de rejets normaux.

On relève une contradiction surprenante entre, d'une part :

p. 17 : **CONCLUSIONS DES INVESTIGATIONS PRELIMINAIRES**

Sur la base des éléments recueillis et analysés par l'ASN et l'IRSN, l'hypothèse la plus probable pour expliquer la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019 est celle d'une hétérogénéité des concentrations en tritium dans la Loire sur des longues distances, provenant d'un mélange imparfait des rejets du CNPE de Chinon dans le milieu,

et d'autre part :

p. 128 : **ENSEIGNEMENTS**

Cette étude, [...], rend peu probable l'hypothèse qu'un mélange imparfait des rejets du CNPE de Chinon dans le milieu, sur de longues distances, ou qu'une stratification thermique des rejets, puisse expliquer la mesure atypique à 310 Bq/L du 21 janvier 2019.

On ne comprend pas comment une telle incohérence peut apparaître en conclusion du rapport : elle annihile tous les efforts accomplis pour résoudre l'énigme des 310 Bq.

Partant de ce constat d'échec, aucune mesure ne peut être prise pour éviter à l'avenir de nouveaux dépassements : l'étude du tritium dans la Loire n'a pas rempli sa mission.

L'enquête a cependant mis en lumière des dysfonctionnements importants concernant les rejets d'effluents des CNPE :

- les zones de mélange des effluents dans le fleuve sont beaucoup plus longues que ne le suppose la réglementation. Il est constaté que les mélanges ne sont pas réalisés à Saumur, mais nul ne sait où le mélange complet se réalise. Les zones de mélange des CNPE ont une longueur indéterminée en Loire ;
- les zones de mélange des affluents dans le fleuve sont également si longues qu'elle perturbent les calculs théoriques de dilution qui sont effectués pour doser les rejets suivant la règle « 80 D » qui postule que, après mélange complet, la concentration volumique ne doit pas être supérieure à 80 Bq /l ;
- les panaches de rejets peuvent se cumuler de centrale en centrale le long de la Loire ;
- la station SMP de Chinon ne donne des mesures justes uniquement quand le débit de la Loire est inférieur à 100 m³/s, soit quelques jours par an !
- des erreurs de rejets arrivent parfois, comme à Chinon le 21 sept 2020 : rejet insuffisamment pré-dilué. Des rejets accidentels peuvent provoquer des pics de pollutions.

Ce que le rapport ne dit pas :

- les centrales gardent secrètes les dates des rejets, ce qui met l'IRSN dans l'impossibilité de réaliser des contrôles réellement efficace ;
- les limites de concentrations volumiques accordées par les ARPE sont des moyennes qui autorisent des pics momentanés importants ;
- le rapport évoque les limitations en rejet de tritium : 280 Bq/l en moyenne horaire et 140 Bq/l en moyenne journalière. Mais il passe sous silence la limite de 80 Bq/l, (moyenne 24 heure et après mélange), que postule la limite du débit d'activité avec la formule « 80 D » ;
- les 310 Bq/l y sont qualifiés d' « atypiques » ou « inhabituels », mais jamais d'**excessifs** ;
- les rejets de tritium et d'autres matières radioactives sont des **pollutions**. Le mot est absent du rapport.

Ce que les recommandations de l'IRSN ne demandent pas :

- la déclaration préalable des rejets par l'exploitant de manière à pouvoir effectuer des contrôles efficaces ;
- la réfection complète de la SMP de Chinon dont les mesures sont fausses depuis toujours !

- la coordination des rejets des 4 centrales de la Loire pour éviter le cumul des panaches ;
- la mise en place de contrôles rigoureux des rejets avant déversement dans les fleuves, puisque les mauvais mélanges faussent les contrôles en aval des rejets. Ces contrôles devraient permettre de vérifier l'efficacité de la pré-dilution, le débit d'activité au rejet et l'activité volumique.

— ACRO

La surveillance citoyenne des rejets radioactifs des installations nucléaires mise en place par l'ACRO – avec des associations partenaires dans le cas du bassin de la Loire – a pour but de répondre à des questions ignorées par la surveillance officielle. C'est pourquoi les prélèvements se font souvent dans des lieux jamais investigués par ailleurs et dans des conditions différentes, tout en respectant la rigueur scientifique et les normes, du prélèvement à la mesure.

La concentration en tritium de 310 Bq/L mesurée par l'ACRO dans un échantillon prélevé le 21 janvier 2019 dans la Loire depuis le milieu du pont Cessart à Saumur est particulièrement élevée par rapport à ce qui est mesuré par ailleurs. Un tel résultat demandait des investigations et l'ACRO est très satisfaite de l'ampleur de la réponse officielle. C'est particulièrement le cas de la présente étude qui a coûté l'équivalent de trois années de budget de l'association.

La principale conclusion de l'étude est de confirmer qu'il n'y a pas de bon mélange des rejets en tritium sur plus de 20 km en aval de la centrale nucléaire de Chinon, comme l'ACRO l'avait déjà montré dans sa note publiée le 6 octobre 2020. L'hypothèse de bon mélange était pourtant bien ancrée dans les esprits et est sous-jacente aux autorisations de rejet. Dans sa note datée du 17 octobre 2019, l'IRSN avait, sur cette base, mis en cause notre « *méthodologie du prélèvement* » qui n'aurait pas été effectué dans la « *zone de bon mélange* ».

La présente étude clôt le débat et personne ne sait situer la zone de bon mélange sur laquelle repose la réglementation liée aux rejets.

La principale conséquence est que, la plupart du temps, la station multi-paramètres d'EDF, qui sert aussi à l'IRSN, ne détecte pas les rejets radioactifs de la centrale de Chinon qu'elle est supposée surveiller ! Et, comme le souligne l'IRSN, elle ne peut donc pas détecter d'éventuels rejets non maîtrisés. Une telle situation est d'autant plus inquiétante que le tritium se retrouve dans l'eau de distribution en aval des installations nucléaires le long de la Loire et la Vienne.

Enfin, la principale valeur ajoutée de cette étude est la modélisation de la dispersion des rejets radioactifs dans le fleuve. Dès les premiers échanges sur ce projet d'étude, en février 2020, l'ACRO avait suggéré de ne pas se limiter au pont Cessart et d'utiliser aussi d'autres ponts en amont pour étudier les transects. L'association soulignait aussi l'intérêt d'effectuer également des prélèvements à différentes profondeurs, afin de mieux appréhender la dispersion verticale et de faire des simulations numériques préalables afin de mieux déterminer les points de prélèvement pertinents pour contraindre les modèles.

Les résultats présentés dans cette étude sont indispensables pour comprendre le comportement des rejets, mais la modélisation ne peut, en aucun cas, remplacer un système de surveillance performant.

Enfin, l'ACRO a apprécié la mise en place et le fonctionnement du comité de suivi de l'étude. Elle espère que les parties prenantes seront associées à la suite des investigations et mesures correctives, car les questions ouvertes restent nombreuses. Il est important que le contrôle des rejets par l'exploitant et l'IRSN soit effectif. Il y a aussi un besoin de beaucoup plus de transparence sur les rejets. Enfin, des actions sont nécessaires pour réduire l'impact sur l'eau de distribution.

Sans la surveillance mise en place par les associations locales et l'ACRO, toutes ces questions n'auraient pas été soulevées. Ces organisations vont donc poursuivre leur surveillance citoyenne des rejets des installations nucléaires dans le bassin de la Loire.

— EDF

EDF tient tout d'abord à remercier IRSN pour l'organisation et le pilotage du comité de suivi ainsi qu'à saluer le travail réalisé dans le cadre de cette campagne de mesure du tritium dans la Loire à Saumur.

L'objectif principal annoncé de cette étude était « ***d'étudier la reproductibilité de la mesure anormalement élevée de tritium au pont Cessart dans des conditions proches de celle du prélèvement citoyen de janvier 2019*** ».

- ⇒ EDF constate que sur plus de 1 000 mesures réalisées durant les 5 mois de l'étude, dont une période présentait des conditions de rejet des CNPE et environnementales proches de celles de janvier 2019, la valeur atypique de 310 Bq/L de janvier 2019 rapportée par ACRO n'a pas été reproduite. Les mesures de tritium en Loire sont toutes comprises entre 2,3 Bq/L et 57 Bq/L.

Le deuxième objectif de cette campagne de mesure était de « **comparer les mesures aux modélisations** ». Pour y répondre, IRSN a mis en œuvre ses outils de modélisation mono dimensionnelle SYMBIOSE (1D) et bidimensionnelle CASTEAUR (2D). A cette fin, EDF a transmis mensuellement à IRSN, en toute transparence durant les 5 mois de l'étude, toutes les données de rejets des CNPE situés en bord de Loire et Vienne.

- ⇒ EDF note que les travaux effectués par IRSN sur les modèles ont apporté des éléments de compréhension sur la dispersion des rejets d'effluents en Loire et permettent de bien rendre compte de l'évolution de la concentration en tritium dans la masse d'eau. Ces éléments sont cohérents avec les résultats des études de dilution et les travaux de modélisation qu'EDF a débuté en 2017, qui ont été présentés en comité de suivi et qui se poursuivent actuellement.
- ⇒ EDF observe que les modélisations ne permettent pas, même dans des conditions majorantes, de retrouver le niveau de la mesure atypique rapportée par ACRO.
 - La concentration en tritium estimée le 21 janvier 2019 au pont Cessart par la modélisation 1D est au plus de 70 Bq/L.
 - Au niveau du pont Cessart, la modélisation 2D conduit à une concentration maximale en tritium variant de 80 Bq/L à 160 Bq/L dans des conditions de rejet réalistes et conformes aux exigences réglementaires de réalisation des rejets.

Le troisième objectif de cette campagne était « **d'en partager les enseignements avec les parties prenantes** ».

- ⇒ EDF a contribué à cet objectif en apportant des réponses documentées aux questions qui lui ont été posées, en présentant les résultats de ses études de dilution débutées en 2017 et des travaux menés dans l'objectif de mieux comprendre la dispersion des rejets en aval du CNPE de Chinon. Ces travaux de modélisation seront poursuivis, notamment afin d'étudier comment rendre la station SMP aval du CNPE de Chinon moins dépendante des différents régimes hydrauliques de la Loire. EDF, exploitant responsable certifié ISO 14 001, producteur d'une électricité peu carbonée, est soucieux de la préservation de l'environnement et de la biodiversité. A ce titre, nous agissons pour limiter et réduire nos rejets dans l'environnement. Ainsi, EDF a à cœur d'utiliser les meilleures techniques disponibles qui, appliquées à la mesure, font que tous les laboratoires environnement de nos CNPE sont agréés par ASN et accrédités par le Cofrac pour différentes mesures dont celle du tritium.

Président de la Cli du CNPE de Chinon (Franck Chartier)

Nous accusons bonne réception de « *l'étude Tritium dans la Loire au pont Cessart à Saumur* ». N'ayant pu, pour des raisons d'agenda et d'ordre du jour déjà défini, inscrire la présentation de cette étude à la CLI de Chinon du 11 janvier dernier (2022), nous allons réunir très prochainement le comité de suivi qui avait eu en charge cette question. A l'issue des réflexions et analyses qui suivront, la CLI de Chinon émettra un avis motivé auprès de vous d'ici le mois de mars. Vous pouvez compter sur l'implication entière et totale de notre commission suite à ce travail d'étude complet qu'ont réalisé vos services.

GLOSSAIRE

Terme	Définition
ACRO	L'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest, (ACRO) fut créée par un millier de personnes dans les mois qui ont suivi l'accident de Tchernobyl, en réaction à une carence en information et en moyens de contrôles de la radioactivité localement adaptés à la situation, le tout dans un contexte de crise de confiance. L'émergence d'une telle structure indépendante est liée à la volonté de la société civile de rendre le citoyen auteur et acteur de la surveillance de son environnement, comme de son information. C'est une association agréée de protection de l'environnement dans le cadre des régions de Basse-Normandie et de Haute-Normandie.
ANCCLI	Créée le 5 septembre 2000, L'ANCCLI est l'Association Nationale des Comités et Commissions Locales d'Information. Régie par la loi du 1er juillet 1901, elle regroupe 34 Commissions Locales d'Information (CLI). L'ANCCLI fédère les expériences et les attentes des Cli et porte leurs voix auprès des instances nationales et internationales.
ARS	Agence régionale de Santé. Les agences régionales de santé sont chargées du pilotage régional du système de santé. Elles définissent et mettent en œuvre la politique de santé en région, au plus près des besoins de la population.
ASN	<p>Autorité de sûreté nucléaire : Autorité administrative indépendante, créée en 2006 dont les missions sont :</p> <ol style="list-style-type: none">1. contribuer à l'élaboration de la réglementation, en donnant son avis au Gouvernement sur les projets de décrets et d'arrêtés ministériels ou en prenant des décisions réglementaires à caractère technique ;2. contrôler le respect des règles et des prescriptions auxquelles sont soumises les installations ou activités qu'elle contrôle ;3. participer à l'information du public, y compris en cas de situation d'urgence. <p>L'ASN dispose de 11 divisions territoriales.</p>
Bassin versant	Portion de territoire délimitée par une ligne de crête ou de partage des eaux à l'intérieur de laquelle toutes les eaux reçues convergent vers un même exutoire.
Becquerel (Bq)	<p>Unité de mesure, légale et internationale, utilisée pour quantifier la radioactivité. Le becquerel (Bq) est égal à une désintégration par seconde. Il mesure l'activité d'une source radioactive, c'est-à-dire le nombre de transformations ou désintégrations d'atomes qui s'y produisent en une seconde, cette transformation s'accompagnant de l'émission d'un rayonnement. Par exemple, un corps dont l'activité est de 12000 becquerels signifie que 12000 atomes s'y désintègrent à chaque seconde. Le becquerel est égal à une désintégration par seconde.</p> <p>Quelques exemples de radioactivité naturelle : un litre de lait : 60 Bq, un litre d'eau de mer : de 10 à 15 Bq, le sol granitique : 8000 Bq/kg, un enfant de 5 ans : 600 Bq, un homme de 70 kg : 10000 Bq.</p>
Bief	Littéralement il s'agit d'une portion d'écoulement dérivée d'un moulin ou d'une usine à eau (canaux de décharge ou de vidange, exutoires des déversoirs, section entre deux écluses...). Dans le cadre du présent rapport, la notion de bief est généralisée à une portion de cours d'eau.

Terme	Définition
Bruit de fond	<p>On désigne par « bruit de fond » radiologique environnemental, les concentrations des différents radionucléides présents dans l'environnement, en dehors de toute influence d'une installation (industrie nucléaire, autres industries, rejets hospitaliers...). Le bruit de fond résulte d'une part de sources naturelles de radioactivité, constituant le bruit de fond radiologique naturel, d'autre part de la persistance d'apports anciens de radionucléides artificiels qui ont concerné l'ensemble du territoire ; il s'agit notamment en France des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et des retombées de l'accident de Tchernobyl. Le bruit de fond radiologique naturel a deux origines, d'une part les radionucléides dits telluriques présents sur terre depuis sa formation (Potassium 40, descendants de l'uranium et du thorium...), d'autre part le rayonnement en provenance du cosmos, appelé rayonnement cosmique, qui produit de manière permanente des radionucléides dans l'atmosphère. La radioactivité tellurique est la radioactivité qui émane du sol. L'écorce terrestre contient en effet des atomes radioactifs qui sont la source d'une radioactivité naturelle : le potassium 40, le thorium 232, l'uranium 235 et l'uranium 238. Dotés de très longues durées de vie, de l'ordre du milliard ou de plusieurs milliards d'années, ils sont encore loin d'avoir disparus et font pour cette raison partie intégrante de notre environnement. Avec leurs produits de filiation, ces radionucléides sont responsables du rayonnement « tellurique », qui est le rayonnement des roches.</p> <p>Le bruit de fond en tritium dans les cours d'eau hors influence des installations nucléaires est aujourd'hui de l'ordre de 1 à 2 Bq/L.</p>
CBM	Concentration de bon mélange. Il s'agit du rapport entre le débit de rejet et le débit du cours d'eau.
Clarinette de rejet	Ouvrage de rejet des effluents liquides des CNPE constitué d'une conduite multipores positionnée dans le cours d'eau et perpendiculairement à la rive.
CLI	En France, chaque installation nucléaire est pourvue d'une Cli qui a une double mission : informer la population sur les activités nucléaires et assurer un suivi permanent de l'impact des installations nucléaires.
CNPE	Centre nucléaire de production d'électricité
Coefficient de Stricker	Le coefficient de Strickler (K_s , $m^{1/3}/s$), est un coefficient empirique qui sert à calibrer les pertes de charge d'un écoulement de rivière du fait des frottements induits par la rugosité et la géométrie du lit.
COFRAC	Comité français d'accréditation.
Composante abiotique	Composante non vivante du milieu. Dans le cas des cours d'eau il s'agit essentiellement de l'eau et des particules solides en suspension ou dans les sédiments de fond.
Concentration en tritium	Le terme concentration en tritium dans l'eau correspond à l'activité volumique du tritium dans l'eau exprimée en Bq/L. Pour des facilités de compréhension, le terme concentration sera conservé tout le long du document.

Terme	Définition
DDT	<p>Direction départementale des territoires. Ses missions sont de :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. mettre en œuvre les politiques d'aménagement et de développement durable des territoires urbains et ruraux et en assurer la promotion ; 2. décliner les politiques agricoles, d'urbanisme, de logement, de construction, de transports et de sécurité routière ; 3. participer à la protection des personnes via la prise en compte des risques naturels, des nuisances et des pollutions ; 4. veiller à la gestion et la protection de la faune et de la flore sauvages, des eaux et des espaces naturels, forestiers et ruraux ainsi que la chasse et la pêche.
Défluent	Bras d'un cours d'eau qui se sépare de l'écoulement principal et ne le rejoint jamais en aval.
Distance de bon mélange	Distance minimale à l'aval d'un rejet à partir de laquelle les concentrations induites par l'effluent sont homogènes sur la largeur du cours d'eau.
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.
Eau des Abatilles	Eau utilisée comme eau de référence lors des mesures de concentration en tritium. Cette eau, issue d'un forage profond, non contaminée par les eaux de surface, présente une concentration en tritium très faible ($\approx 0,05$ Bq/L), négligeable vis-à-vis de celle des échantillons à analyser.
Echantillon aliquote	Fraction d'un échantillon identique à l'échantillon mère.
EDF	Electricité de France – Entreprise française (SA à conseil d'administration) de production et de distribution d'électricité.
FNE	France nature environnement.
Hydrocollecteur	Appareil de prélèvement d'eau programmable, permettant l'échantillonnage ponctuel ou séquentiel d'un volume précis de liquide selon le paramétrage établi.
HYDRO	Base de données repertoriant les hauteurs d'eau mesurées sur environ 5000 stations de mesure positionnées sur les cours d'eau français et avec lesquelles sont calculées puis enregistrées dans cette même base les débits instantanés, journaliers, mensuels...
IRSN	L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, l'expert public en matière de recherche et d'expertise sur les risques nucléaires et radiologiques, est placé sous la tutelle conjointe des ministres chargés de l'écologie, de la recherche, de l'énergie, de la santé et de la défense.
Limite de détection	La limite de détection indique la plus petite valeur vraie de la grandeur mesurée qui peut encore être détectée par la procédure de mesurage utilisée.
Réseau Loire Alerte	Syndicat regroupant les collectivités productrices d'eau potable de Loire, Maine et Loire et Loire Atlantique, est une partie prenante dont l'un des objectifs est d'assurer une veille de la qualité des eaux de la Loire et d'alerter et de prendre des dispositions en cas de pollution. Bien que plus souvent confronté à des pollutions par des hydrocarbures, le réseau est également concerné par tout autre polluant potentiel dont les polluants radioactifs.

Terme	Définition
Réservoir KER (bâche KER)	Réservoir dédié à la collecte d'effluents liquides de l'îlot nucléaire.
RNM	Réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement www.mesure-radioactivite.fr
Seuil de décision	Le seuil de décision est la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologue puisse considérer que l'activité détectée est liée à l'échantillon et donc « mesurable ». En dessous de cette valeur, l'activité de l'échantillon est donc trop faible pour être estimée. Ce seuil de décision dépend de la performance des moyens métrologiques utilisés et du rayonnement ambiant lors de la mesure.
Sievert	Unité légale d'équivalent de dose ou dose efficace qui permet de rendre compte de l'effet biologique produit par une dose absorbée donnée sur un organisme vivant. L'équivalent de dose n'est pas une quantité physique mesurable mais obtenue par le calcul. Elle dépend de l'énergie transmise aux tissus, du type de rayonnement et du tissu traversé.
Significatif	Mesure ou résultat significatif : Résultat de mesure supérieur au seuil de décision. Voir "seuil de décision".
SMP	Les stations multi-paramètres, situées à l'amont et à l'aval du CNPE, mesurent en continu le pH, la conductivité, la température de la conductivité, la température de l'eau et l'oxygène dissous dans le milieu récepteur.
Station HYDRO	Station de mesure de hauteur d'eau sur un cours d'eau à partir de laquelle des débits sont calculés et stockés dans la banque HYDRO du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.
Thermographie	Mesure de température par caméra infrarouge.
TOL	Tritium organiquement lié.
Tritium	Isotope radioactif de l'hydrogène, de symbole ^3H . C'est un émetteur β^- , de période physique de 12,3 ans.

Table des illustrations et tableaux

Illustrations

Figure 1 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire et de la Vienne mesurées par les systèmes de surveillance de l'IRSN et d'EDF entre janvier 2017 et avril 2019.	9
Figure 2 : Estimation des niveaux de tritium attendus à Saumur à partir des mesures de la surveillance effectuées dans la Loire et la Vienne	10
Figure 3 : Concentrations en tritium dans la Loire à Saumur estimées (à l'aide du logiciel CASTEAUR) entre le 1 ^{er} et le 31 janvier 2019, sur la base des rejets déclarés des CNPE EDF du bassin versant de la Loire et de la Vienne, sous hypothèse de bon mélange desdits rejets.	11
Figure 4 : Comparaison des modélisations 1D (réalisées avec le code CASTEAUR) et des données de la surveillance aval d'EDF au niveau de la SMP aval du CNPE de Chinon pour le mois de janvier 2019	12
Figure 5 : Concentrations en tritium mesurées par l'ACRO à Saumur, dans les eaux potables et dans les eaux de la Loire entre décembre 2017 et mai 2019.....	13
Figure 6 : Point de prélèvement (flèche rouge) du 21 janvier 2019 indiqué par le Collectif	14
Figure 7 : Concentrations en tritium mesurées par l'ACRO à Saumur, dans les eaux potables et dans les eaux de la Loire entre décembre 2017 et août 2020	15
Figure 8 : Concentrations en tritium mesurées par l'ACRO à Saumur, dans les eaux de la Loire entre janvier 2020 et août 2020 (RG = Rive gauche, RD = Rive droite)	15
Figure 9 : Emplacement des cinq CNPE du bassin versant de la Loire situés à l'amont de la ville de Saumur, sur la Loire (Belleville, Dampierre, Saint Laurent, Chinon) et la Vienne (Civaux)	18
Figure 10 : Positionnement des stations multi-paramètres des CNPE de la Loire et de la Vienne	19
Figure 11 : Positionnement des points de prélèvement d'eau de Loire (SMP) du CNPE de Chinon	21
Figure 12 : Localisation des points de prélèvements de l'étude préliminaire	24
Figure 13 : Localisation de la clarinette de rejet et des points de prélèvement 1 et 2.....	25
Figure 14 : Concentrations en tritium dans la Loire de l'amont du CNPE de Chinon au pont Cessart.....	26
Figure 15 : Concentrations en tritium en trois points du pont Cessart entre le 14 et le 18 septembre 2020	27
Figure 16 : Gamme de concentrations en tritium au pont Cessart entre le 14 et le 18 septembre 2020	27
Figure 17 : Localisation des points de prélèvement dans la Loire au niveau du pont Cessart.....	28
Figure 18 : Hydrocollecteur en rive gauche, quai Lucien Gauthier	29
Figure 19 : Hydrocollecteur en rive droite, quai de la Marine (Ile d'Offard)	29
Figure 20 : Localisation des points de prélèvement de substitution A et L pendant la période de crue	29
Figure 21 : Prélèvement et mesures physicochimiques au point J sur le pont Cessart	30
Figure 22 : Extraits d'une image satellitaire Sentinel 2X en date du 15/01/2019 montrant la Loire depuis sa confluence avec la Vienne jusqu'en aval de Saumur	33
Figure 23 : Emprise couverte par les images des satellites Sentinel 2A et 2B pour générer un réseau hydrographique compatible avec les faibles largeurs de la période d'étiage observée lors de l'étude de faisabilité de la campagne de mesure, mi-septembre 2020.....	35
Figure 24 : Réseau fluvial modélisé (la Loire et la Vienne) pour l'étude, permettant le calcul simultané du transfert du tritium rejeté par Belleville, Dampierre, Saint Laurent, Chinon et Civaux, et stations HYDRO utilisées pour le calage hydraulique (points épinglés)	36
Figure 25 : Débits de la Vienne en différentes stations, mesurées en bleu (banque HYDRO) et simulées en rouge (SYMBIOSE)	37
Figure 26 : Débits de la Loire en différentes stations, mesurées en bleu (banque HYDRO) et simulées en rouge (SYMBIOSE)	39

Figure 27 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées en amont de Chinon (P0) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet.....	41
Figure 28 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées en aval de Chinon (P1 / P2) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet.....	42
Figure 29 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées sur la Loire en amont de sa confluence avec la Vienne (P3 / P4) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet.....	42
Figure 30 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées sur la Vienne en amont de sa confluence avec la Loire (P5) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet.....	43
Figure 31 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées en aval de la confluence de la Loire et de la Vienne (P6 / P7) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet et en supposant que la Vienne et la Loire sont parfaitement mélangés dès leur confluence.....	43
Figure 32 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées sur le pont Cessart (P8 à P12) et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet et en supposant que la Vienne et la Loire sont parfaitement mélangés dès leur confluence	44
Figure 33 : Comparaison entre les résultats des mesures réalisées sur le pont du Cadre Noir, en aval du pont Cessart (P13 / P14), et les simulations effectuées avec SYMBIOSE, en supposant le mélange du tritium homogène latéralement en aval de chaque point de rejet et en supposant que la Vienne et la Loire sont parfaitement mélangés dès leur confluence.....	44
Figure 34 : Localisation des sections de mesure de la campagne du 27 mars 2019	46
Figure 35 : Biefs de calcul pour la campagne du 27 mars 2019	47
Figure 36 : Comparaison modèle-mesure pour la campagne du 27 mars 2019	49
Figure 37 : Localisation des sections de mesure de la campagne du 24 juin 2020.....	51
Figure 38 : Biefs de calcul pour la campagne du 24/06/2020	51
Figure 39 : Comparaison modèle-mesure pour la campagne du 24 juin 2020	53
Figure 40 : Localisation des sections de mesure de la campagne du 25 octobre 2017	54
Figure 41 : Biefs de calcul pour la campagne du 25 octobre 2017	55
Figure 42 : Comparaison modèle-mesure pour la campagne du 25 octobre 2017	57
Figure 43 : Température et débit de la Loire à la station HYDRO de Saumur en janvier 2019	58
Figure 44 : Identification d'une période de la campagne où les conditions de température et de débit de la Loire sont similaires à celles du 21 janvier 2019.....	59
Figure 45 : Exemple du traitement sous SIG, après extraction d'une zone d'intérêt et exploitation de bandes spectrales de l'image pour identifier les surfaces en eau de la Loire et de la Vienne (en bleu).....	60
Figure 46 : Rejets liquides mensuels en tritium des CNPE du bassin versant de la Loire entre janvier 2018 et avril 2021	61
Figure 47 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE), en supposant que Loire et Vienne sont mélangées, en janvier 2019	62
Figure 48 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE), en supposant que Loire et Vienne sont mélangées, entre fin novembre 2020 et mi-décembre 2020	62
Figure 49 : Relevés thermographiques de la Cli de Chinon.....	66
Figure 50 : Bilan des campagnes de mesure du tritium dans la Loire par EDF	67
Figure 51 : Perspectives d'actions d'EDF pour donner suite à son étude de dilution du tritium dans la Loire	68
Figure 52 : Résultats des campagnes de mesure d'EDF à la SMP aval.....	68

Figure 53 : Campagnes de suivi thermique des eaux de la Loire par EDF	69
Figure 54 : Mesures thermographiques EDF des rejets du CNPE de Chinon	70
Figure 55 : Visualisation thermographique des rejets du CNPE de Chinon et des apports de l'Indre	70
Figure 56 : Visualisation thermographique des rejets du CNPE de Chinon par les 11 buses	71
Figure 57 : Transect de température en amont et en aval du pont Cessart à Saumur par EDF	71
Figure 58 : Transect des températures des eaux de la Loire au pont Cessart à Saumur par EDF	72
Figure 59 : Bilan des suivis thermiques EDF	72
Figure 60 : Points de prélèvement les 5 et 6 novembre 2020	74
Figure 61 : Concentrations en tritium de l'eau prélevée en 12 points du pont Cessart les 5 et 6 novembre 2020	74
Figure 62 : Débit de la Loire au pont Cessart au cours de l'étude	75
Figure 63 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 9 novembre 2020 et le 8 avril 2021	76
Figure 64 : Gammes de concentrations quotidiennes en tritium au pont Cessart entre le 9 novembre 2020 et le 8 avril 2021	77
Figure 65 : Ecart entre les concentrations quotidiennes maximales et minimales mesurées en tritium au niveau du pont Cessart sur une plage de prélèvement de 30 minutes	78
Figure 66 : Gammes de concentrations significatives (supérieures aux seuils de décision) en tritium mesurées au pont Cessart au cours de la campagne	79
Figure 67 : Fréquences des gammes de concentrations en tritium en fonction du point de prélèvement	79
Figure 68 : Prise de température sur un prélèvement d'eau au pont Cessart pendant la campagne	80
Figure 69 : Mesures de température de la Loire au pont Cessart à Saumur du 9 novembre 2020 au 8 avril 2021 i) par l'IRSN, sur les prélèvements d'eau de Loire, à proximité de la surface et ii) par la DREAL Pays de la Loire via une sonde fixe au fond, en rive droite	80
Figure 70 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D, en supposant que Loire et Vienne sont mélangées, et concentration mesurée, entre novembre 2020 et avril 2021	83
Figure 71 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D, en supposant que Loire et Vienne ne sont pas mélangées, et concentration mesurée, entre novembre 2020 et avril 2021	86
Figure 72 : Points de prélèvement de l'ACRO au pont Cessart (rapport ACRO du 6 octobre 2020)	88
Figure 73 : Comparaison entre le modèle 2D et les mesures ACRO à Saumur	92
Figure 74 : Modèle 2D vs mesures de la campagne IRSN à Saumur	94
Figure 75 : Synthèse de la comparaison entre la modélisation 2D et les mesures ACRO et IRSN	95
Figure 76 : Concentrations en tritium à la SMP aval de Chinon mesurées dans les prélèvements aliquotes moyens journaliers (les points rouges évidés sont les seuils de décision pour les mesures inférieures à la limite de détection) et débit de la Loire (pointillés bleus), de novembre 2020 et avril 2021	96
Figure 77 : Localisation de la SMP aval du CNPE de Chinon	97
Figure 78 : Modélisation 1D vs Surveillance à la SMP aval de Chinon entre mai 2018 et mai 2019	99
Figure 79 : Débit de la Loire à l'aval du CNPE de Chinon de mai 2018 à mai 2019	99
Figure 80 : Traçages EDF et modélisation 2D à la SMP aval du CNPE de Chinon	100
Figure 81 : Concentrations en tritium à la SMP aval de Chinon prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE) et mesurée, entre novembre 2020 et avril 2021	102
Figure 82 : Concentrations en tritium mesurées sur des prélèvements effectués par l'IRSN en amont des rejets du CNPE de Chinon, le 13/01/21	103
Figure 83 : Variations du rapport C_{SMP}/CBM en fonction du débit de la Loire entre fin août 2020 et avril 2021	105

Figure 84 : Corrélation entre les mesures mi-rejet et les modélisations 2D à la SMP aval du CNPE de Chinon entre fin août 2020 et avril 2021	106
Figure 85 : Vues aériennes du lit de la Loire à la SMP à fort et faible débits	106
Figure 86 : Exemples de modélisations 2D au transect de la SMP pour des débits variant de 67 à 1200 m ³ /s.	107
Figure 87 : Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE), en supposant que les eaux de la Loire et de la Vienne sont mélangées, en janvier 2019	109
Figure 88: Concentration en tritium au niveau du pont Cessart à Saumur prédite par la modélisation 1D (SYMBIOSE), en supposant que les eaux de la Loire et de la Vienne ne sont pas mélangées, et concentration mesurée, en janvier 2019	110
Figure 89 : Modélisation 2D des concentrations à l'aval du CNPE de Chinon le 21/01/2019.....	112
Figure 90 : Profils de concentrations en différents points et pour différentes configurations des buses de la clarinette de rejet appliqué au rejet qui s'est déroulé entre le 19 et le 21 janvier 2019	113
Figure 91 : Modélisation 2D des concentrations à Saumur le 21/01/2019 pour une concentration de rejet supposée quatre fois supérieure à la valeur déclarée	115
Figure 92 : Concentrations en tritium des effluents sortant de la station de traitement des effluents et rejetés par le CNPE Chinon, de janvier 2018 à avril 2021. Le point rouge identifie l'activité volumique en tritium déclarée de l'effluent rejeté du 19 au 21/01/2019 et passant à Saumur le 21/01/2019.....	115
Figure 93 : Modélisation 2D des concentrations à Saumur le 21/01/2019 pour une concentration de rejet supposée 2 fois supérieure à la valeur déclarée	116
Figure 94 : Modélisation 1D du débit de la Loire à l'amont du CNPE de Chinon entre le 19 et le 21 septembre 2020	119
Figure 95 : Modélisation 1D de la concentration en tritium de la Loire à l'amont du CNPE de Chinon entre le 19 et le 21 septembre 2020	120
Figure 96 : Modélisation 2D au droit de la SMP aval entre le 19 et le 21 septembre 2020 avec la concentration bâche initialement mesurée à 2,7.10 ⁵ Bq/L.....	120
Figure 97 : Modélisation 2D au droit de la SMP aval entre le 19 et le 21 septembre 2020 avec la concentration bâche corrigée d'un facteur 3,8.....	121
Figure 98 : Modélisation 2D au droit de la SMP aval et au pont Cessart entre le 19 et le 21 septembre 2020 avec la concentration bâche corrigée d'un facteur 3,8 et les largeurs de l'écoulement réduites de 5 %	121
Figure 99 : Représentation du cours d'eau dans le code CASTEAUR	133
Figure 100 : Illustration du maillage d'un bief au pas d'espace Δx	133
Figure 101 : Illustration d'un champ de concentration donné par l'équation 1 pour un rejet ponctuel.....	136
Figure 102 : Exemple d'organisation des biefs de calcul.....	137
Figure 103 : Représentation et principaux paramètres d'un bief	137
Figure 104 : Données hydrauliques à un bief.....	138
Figure 105 : Données des apports	139
Figure 106 : Correction des rebonds sur les berges du panache issue d'un point source	139
Figure 107 : Discrétisation des liaisons sortantes et projection vers les liaisons entrantes	139
Figure 108 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 9 et le 30 novembre 2020	177
Figure 109 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 1er et le 31 décembre 2020	178
Figure 110 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 1er et le 31 janvier 2021	179
Figure 111 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 1er et le 28 février 2021	180

Figure 112 : Concentrations en tritium dans l'eau de la Loire au pont Cessart à Saumur entre le 1 ^{er} mars et le 8 avril 2021	181
---	-----

Tableaux

Tableau 1 : Décisions ASN applicables aux CNPE de la Loire et de la Vienne	19
Tableau 2 : Valeurs de débits du cours d'eau minimales et maximales autorisant un rejet	20
Tableau 3 : Limites de débit de rejet pour chaque CNPE de la Loire et la Vienne	20
Tableau 4 : Activités volumiques limites prescrites	21
Tableau 5 : Prélèvements et mesures relatives à la surveillance des eaux de surface en amont et aval du site de Chinon	22
Tableau 6 : Analyses réalisées par EDF sur les prélèvements du compartiment aquatiques	22
Tableau 7 : Libellé et localisation des points de prélèvement de l'étude préliminaire	24
Tableau 8 : Récapitulatif des points de prélèvements et mesures associées	31
Tableau 9 : Conditions de débit associées aux dates des vues aériennes fournies par le logiciel Google Earth	45
Tableau 10 : Paramètres de calcul appliqués aux trois campagnes de mesures	45
Tableau 11 : Caractéristiques générales de la campagne du 27 mars 2019	46
Tableau 12 : Caractéristiques des prélèvements de la campagne du 27 mars 2019	47
Tableau 13 : Apports de débit aux affluents et aux liaisons entrantes pour la campagne du 27 mars 2019	48
Tableau 14 : Bruits de fond des concentrations en tritium pour la campagne du 27 mars 2019	48
Tableau 15 : Caractéristiques générales de la campagne du 24 juin 2020	50
Tableau 16 : Caractéristiques des prélèvements de la campagne du 24 juin 2020	51
Tableau 17 : Apports de débit aux affluents et aux liaisons entrantes pour la campagne du 24 juin 2020	52
Tableau 18 : Bruits de fond des concentrations en tritium pour la campagne du 24 juin 2020	52
Tableau 19 : Caractéristiques générales de la campagne du 25 octobre 2017	54
Tableau 20 : Caractéristiques des prélèvements de la campagne du 25 octobre 2017	55
Tableau 21 : Apports de débit aux affluents et aux liaisons entrantes pour la campagne du 25 octobre 2017	55
Tableau 22 : Bruits de fond des concentrations en tritium pour la campagne du 25 octobre 2017	56
Tableau 23 : Rejets liquides de tritium annuels par CNPE du bassin versant de la Loire (TBq/an), de 2018 à 2020	61
Tableau 24 : Date et heure d'arrêt et de reprise des rejets d'effluents radioactifs durant la crue de la Loire	78
Tableau 25 : Dates et concentrations en tritium (Bq/L) des mesures ACRO retenues pour la comparaison avec le modèle 2D	88
Tableau 26 : Dates et concentrations en tritium (Bq/L) des mesures IRSN en 5 points retenues pour la comparaison avec le modèle 2D	89
Tableau 27 : Dates et concentrations en tritium (Bq/L) des mesures IRSN en 12 points retenues pour la comparaison avec le modèle 2D	89
Tableau 28 : Paramétrage des débits de la Loire Amont et de la Vienne et valeurs ajustées du paramètre de diffusion cy pour la comparaison du modèle 2D avec les mesures de l'ACRO	89
Tableau 29 : Paramétrage des débits de la Loire Amont et de la Vienne et valeurs ajustées du paramètre de diffusion cy pour la comparaison du modèle 2D avec les mesures de l'IRSN	90
Tableau 30 : Paramétrage des concentrations et débit de rejet à partir des modélisations 1D pour la comparaison du modèle 2D avec les mesures de l'ACRO	90
Tableau 31 : Paramétrage des concentrations et débits de rejet à partir des modélisations 1D pour la comparaison du modèle 2D avec les mesures de l'IRSN	91

Tableau 32 : Données d'analyse des concentrations mi-rejet à la SMP aval du CNPE de Chinon (fin août 2020 à avril 2021)	104
Tableau 33 : Débits de la Loire amont et de la Vienne pour la modélisation du 21/01/2019	111
Tableau 34 : Concentrations en tritium de la Loire et de la Vienne et débit de rejet aux buses pour la modélisation du 21/01/2019	111
Tableau 35 : Concentrations minimales et maximales en tritium dans les rejets déclarés sur la période janvier 2018 – avril 2021.....	116
Tableau 36 : Synthèse des paramètres de calcul	134
Tableau 37 : Synthèse des paramètres de calcul	140
Tableau 38 : Paramètres des biefs de calcul pour la campagne du 27 mars 2019	141
Tableau 39 : Matrice de connectivité pour la campagne du 27 mars 2019	142
Tableau 40 : Paramètres des biefs de calcul pour la campagne du 24 juin 2020	142
Tableau 41 : Matrice de connectivité pour la campagne du 24 juin 2020.....	144
Tableau 42 : Paramètres des biefs de calcul pour la campagne du 25 octobre 2017	145
Tableau 43 : Matrice de connectivité pour la campagne du 25 octobre 2017	146
Tableau 44 : Contrôles inopinés réalisés au cours de la campagne.....	147
Tableau 45 : Coordonnées géographiques WGS84 des points de prélèvements	148
Tableau 46 : Résultats des analyses réalisées sur les prélèvements réalisés pendant la campagne.....	148

IRSN
Pôle santé et environnement
Direction de l'environnement

E-mail
contact@irsn.fr

N° du rapport
Rapport IRSN 2022-00034
Tous droits réservés IRSN
Janvier 2022

Photo de couverture © IRSN

Autres photos :

Sauf mention contraire, les photographies aériennes / satellitaires reproduites sont issues de Google Earth.



31, avenue de la division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER

B.P 17
92260 Fontenay-aux-Roses Cedex

TÉLÉPHONE

+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET

www.irsn.fr

Email

contact@irsn.fr

 [@IRSNFrance](https://twitter.com/IRSNFrance)