

Propagation des rejets liquides de tritium des CNPE du bassin de la Loire

Analyse et interprétation par modélisation et comparaison aux données de la surveillance

Rapport IRSN/PSE-ENV/2020-00105

Pôle Santé et Environnement

Service de recherche sur les transferts et les effets des radionucléides sur les écosystèmes

Table des Matières

| | |
|--|-----------|
| TABLE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX | 3 |
| RESUME | 4 |
| 1 INTRODUCTION..... | 5 |
| 2 LOGICIEL CASTEAUR | 7 |
| 3 ETUDE PRELIMINAIRE : DECEMBRE 2018 - JANVIER 2019 | 8 |
| 3.1 Données hydrographiques | 8 |
| 3.1.1 Données hydrographiques de la Loire | 8 |
| 3.1.2 Données hydrographiques de la Vienne | 10 |
| 3.2 Apports d'eau et calculs des débits..... | 10 |
| 3.2.1 En Loire..... | 11 |
| 3.2.2 En Vienne..... | 12 |
| 3.2.3 A Saumur | 13 |
| 3.3 Débits de rejet de tritium des CNPE..... | 14 |
| 3.3.1 Chronique des apports de tritium en Loire des rejets du CNPE de Civaux | 15 |
| 3.4 Paramètres de calcul | 15 |
| 3.5 Concentrations en tritium dans la Loire à Saumur en décembre 2018 et janvier 2019 | 16 |
| 3.6 Concentrations en tritium dans la Loire à l'aval des CNPE..... | 16 |
| 3.7 Interprétation des données de la surveillance à l'aval du CNPE de Chinon | 18 |
| 3.8 Conclusions préliminaires | 19 |
| 4 ETUDE COMPLEMENTAIRE DE MAI 2018 A MAI 2019 | 20 |
| 4.1 Données hydrographiques | 20 |
| 4.2 Apports d'eau et calculs des débits..... | 20 |
| 4.3 Débits de rejets de tritium des CNPE..... | 21 |
| 4.4 Paramètres de calcul | 23 |
| 4.5 Concentrations de tritium à la station de surveillance aval du CNPE de Chinon | 23 |
| 4.6 Comparaison des données de la surveillance aval des CNPE de Saint Laurent des Eaux et de Chinon..... | 25 |

5 CONCLUSIONS 28

LISTE DES REFERENCES 29

Table des illustrations et des tableaux

Illustrations

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Localisation du pont Cessart à Saumur | 5 |
| Figure 2 : Vue générale des CNPE du bassin de la Loire..... | 6 |
| Figure 3 : Structure générale du logiciel CASTEAUR | 7 |
| Figure 4 : Situation des stations hydrographiques (carte https://www.vigicrues.gouv.fr complétée IRSN) | 10 |
| Figure 5 : Chroniques des débits en Loire entre décembre 2018 et janvier 2019 | 11 |
| Figure 6 : Chroniques des débits en Vienne entre décembre 2018 et janvier 2019 | 12 |
| Figure 7 : Chronique des apports de débit de la Vienne à la Loire entre décembre 2018 et janvier 2019 | 13 |
| Figure 8 : Chroniques des débits de la Loire à Saumur de décembre 2018 à janvier 2019..... | 13 |
| Figure 9 : Débits de rejet de tritium des CNPE de la Loire et de la Vienne entre décembre 2018 et janvier 2019 | 15 |
| Figure 10 : Chronique des apports de tritium de la Vienne dans la Loire..... | 15 |
| Figure 11 : Concentrations de la Loire en tritium modélisées à Saumur entre décembre 2018 et janvier 2019 | 16 |
| Figure 13 : Surveillance aval du CNPE de Chinon vs surveillance aval modifiée du CNPE de Saint Laurent des Eaux .. | 18 |
| Figure 14 : Chroniques des débits de la Loire entre mai 2018 et mai 2019..... | 21 |
| Figure 15 : Chronique des apports de l'Indre (PK 260.5)..... | 21 |
| Figure 16 : Débits de rejet de tritium des CNPE de la Loire entre mai 2018 et mai 2019 | 22 |
| Figure 17 : Concentrations en tritium de la Loire à la station aval du CNPE de Chinon entre mai 2018 et mai 2019 (mesure de l'ACRO du 21/01/2019 hors échelle du graphe) | 24 |
| Figure 18 : Comparaison entre les données de la surveillance aval des CNPE de Saint Laurent des Eaux et de Chinon (mesure de l'ACRO du 21/01/2019 hors échelle du graphe) | 26 |

Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Paramètres hydrographiques de la Loire (rouge : rejets ; bleu : affluents) | 9 |
| Tableau 2 : Paramètres hydrographiques de la Vienne (rouge : rejets ; bleu : affluents) | 10 |

Résumé

Pour tenter de comprendre les phénomènes ou événements susceptibles de conduire à une concentration de tritium de près de 300 Bq.L⁻¹ dans la Loire (telle que celle mesurée par l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest [ACRO] le 21 janvier 2019 à Saumur), l'IRSN a procédé à une modélisation de la dispersion des rejets liquides de tritium par les centrales nucléaires du bassin versant de la Loire et comparé le résultat de ces calculs à ceux de la surveillance radiologique de la Loire et de la Vienne. Ce rapport regroupe le résultat de deux séries de calculs et comparaisons modèle/mesure réalisées l'une en juillet 2019 (et portant sur la période décembre 2018-janvier 2019) et l'autre en octobre 2019 (et portant sur la période mai 2018 à mai 2019).

La modélisation, réalisée avec le logiciel CASTEAUR sous l'hypothèse de bon mélange, montre que les rejets des différents CNPE du bassin de la Loire ne permettent pas d'atteindre la concentration de 310 Bq.L⁻¹ au mois de janvier 2019 à Saumur. Pour atteindre un tel niveau en condition de bon mélange, il faudrait soit la superposition simultanée et improbable d'une dizaine de panaches de rejets, soit l'occurrence d'un événement non déclaré et non détecté d'une amplitude dix fois plus importante que celle des rejets de routine. Néanmoins, il est constaté que l'homogénéisation des concentrations de tritium dans la Loire consécutive aux rejets du CNPE de Chinon n'est pas atteinte au niveau de la station de surveillance située près de 5 km en aval de celui-ci et que le prélèvement de l'ACRO du 21 janvier 2019 a vraisemblablement été réalisé dans le panache de l'un de ses rejets. Pour la période de mai 2018 à mai 2019, à l'exception de la mesure du 21 janvier 2019, les mesures effectuées par l'ACRO sur cette période sont en bon accord avec les valeurs attendues.

Sur la base de ces résultats et à ce stade des investigations, l'hypothèse d'une homogénéisation incomplète des concentrations en Loire aval consécutives aux rejets du CNPE de Chinon s'impose comme étant la plus crédible pour expliquer la valeur mesurée par l'ACRO le 21 janvier 2019.

1 INTRODUCTION

Le 21 janvier 2019, l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest (ACRO) a mesuré une concentration en tritium de 310 Bq.L^{-1} dans un prélèvement d'eau réalisé en rive droite de la Loire sous le pont Cessart à Saumur ([10]) situé 12,5 km en aval de la confluence de La Loire et de la Vienne et à une vingtaine de kilomètres en aval du centre nucléaire de production électrique (CNPE) de Chinon (Figure 1).



Figure 1: Localisation du pont Cessart à Saumur

A la suite de la communication publique de ce résultat par l'ACRO, en juin 2019, l'IRSN a engagé une série de calculs pour tenter d'identifier l'origine de cette valeur qui dépasse significativement les niveaux habituellement observés dans la Loire¹. L'objectif de ces calculs est de vérifier si les rejets en tritium des CNPE du bassin de la Loire sont susceptibles de générer ce niveau de concentration à Saumur, situé à l'aval de tous les CNPE du bassin (Figure 2).

¹ Niveaux compris dans une gamme de <10 à 160 Bq.L^{-1} durant les dix dernières années de surveillance. Près de 50 % de ces mesures sont comprises entre 10 et 60 Bq.L^{-1} .



Figure 2 : Vue générale des CNPE du bassin de la Loire

Les calculs consistent en une modélisation de la propagation du tritium rejeté dans la Loire et la Vienne par les CNPE de Belleville sur Loire, Dampierre en Burly, Saint Laurent des Eaux, Chinon (sur la Loire) et Civaux (sur la Vienne). Les simulations ont été réalisées avec le logiciel CASTEAUR à partir des données hydrographiques de sa base de données, des chroniques de débits de la Loire et de la Vienne extraites de la Banque Hydro (www.hydro.eaufrance.fr/) et des chroniques des rejets liquides de tritium des CNPE déduites des registres transmis à l'IRSN pour cette étude par l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN). Le résultat de ces calculs est ensuite comparé à ceux de la surveillance régulière du tritium dans la Loire et la Vienne, accessibles au travers du site internet du réseau national de mesure de la radioactivité dans l'environnement (RNM, <https://www.mesure-radioactivite.fr/#/>).

Le rapport est structuré en trois parties :

- la première décrit succinctement le logiciel CASTEAUR utilisé pour la modélisation ;
- la seconde présente l'analyse des concentrations en tritium dans la Loire sur la période de décembre 2018 à janvier 2019 et propose les premiers éléments d'explication pour la concentration mesurée le 21 janvier 2019 ;
- la troisième étend la période d'observation pour la porter de mai 2018 à mai 2019, afin d'affiner les premiers éléments d'analyse et d'interprétation.

2 LOGICIEL CASTEAUR

La modélisation a été réalisée avec le logiciel CASTEAUR développé par l'IRSN ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]). Ce logiciel applique des modèles monodimensionnels dynamiques pour simuler les transferts de radionucléides le long d'un linéaire de rivière pour des périodes de quelques heures à plusieurs années et avec des pas de temps de quelques minutes à quelques heures. Sa structure générale est schématisée ci-dessous.

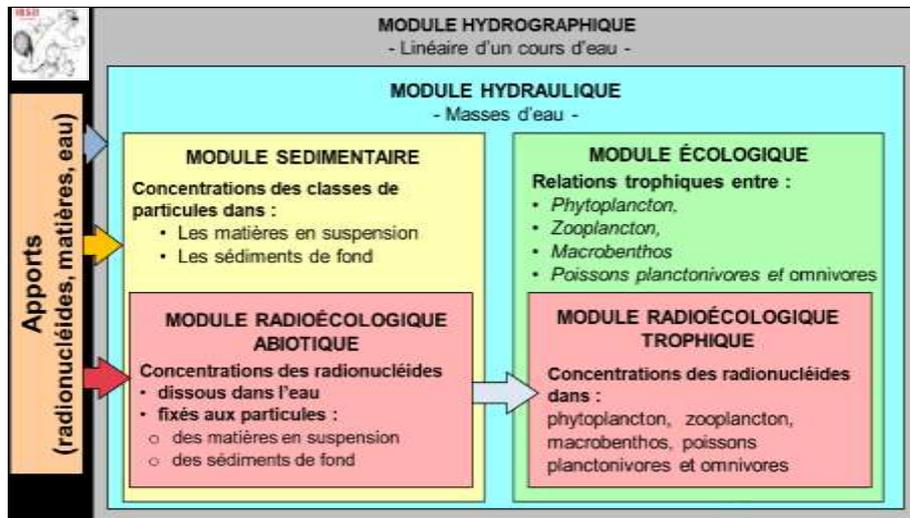


Figure 3 : Structure générale du logiciel CASTEAUR

Le modèle hydrographique représente un linéaire de cours d'eau caractérisé par une série de biefs décrits par leur pente, leur rugosité et une ou plusieurs sections trapézoïdales définies par leurs largeurs et angles de berge. Ce linéaire peut s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres et l'utilisateur fixe le pas d'espace de calcul qui, en pratique, est de l'ordre de quelques centaines de mètres.

Le modèle hydraulique est un modèle dynamique monodimensionnel de type amont - aval. Basé sur l'équation de Manning - Strickler, il calcule la propagation des masses d'eau le long du domaine de calcul. Aux mailles de calcul et à chaque pas de temps le modèle calcule le débit, la vitesse moyenne, la section et le périmètre mouillés, le rayon hydraulique et la tension de frottement. Les données d'entrée sont les chroniques de débit à l'entrée du domaine et aux affluents.

Le modèle sédimentaire est un modèle dynamique monodimensionnel couplé aux modèles hydrographique et hydraulique. Il calcule en chaque maille et à chaque pas de temps les charges en suspension et les masses déposées dans le sédiment de différentes classes de particules définies par leurs propriétés dynamiques (diamètre, masse volumique, tension critique et taux d'érosion). Les processus modélisés sont le transport, la dispersion, le dépôt et l'érosion.

Le modèle radioécologique est un modèle dynamique monodimensionnel couplé aux modèles hydrographique, hydraulique et sédimentaire. En chaque maille et à chaque pas de temps il calcule les concentrations dissoutes et particulières de plusieurs radionucléides dans la colonne d'eau et les sédiments et les concentrations au sein de différentes composantes de la chaîne trophique. Les paramètres sont les propriétés des radionucléides (période de décroissance, coefficient de fractionnement liquide-solide, facteurs de filiation et différentes cinétiques et facteur de transfert aux composantes biotiques) et les données sont la localisation et les chroniques des rejets.

Pour les besoins de cette étude les modules sédimentaires et trophiques n'ont pas été activés dans la mesure où les cibles sont les concentrations en tritium et que ce radionucléide est peu réactif aux particules solides présentes dans les cours d'eau.

Pour la bonne compréhension des interprétations et des conclusions de cette étude, il est important de garder l'esprit qu'il s'agit d'une modélisation dynamique monodimensionnelle avec l'hypothèse d'homogénéisation complète et instantanée des concentrations.

3 ETUDE PRELIMINAIRE : DECEMBRE 2018 - JANVIER 2019

Ce chapitre présente l'étude menée sur la période de décembre 2018 à janvier 2019. L'objectif est de vérifier si les rejets liquides de tritium effectués sur cette période par les différents CNPE du bassin de la Loire peuvent être à l'origine de la mesure à 310 Bq.L⁻¹ réalisée par l'ACRO à Saumur le 21 janvier 2019. Le chapitre décline les données hydrographiques, les débits de la Loire et de la Vienne et les rejets des CNPE pris en compte pour les calculs, l'analyse et l'interprétation des résultats et les conclusions préliminaires.

3.1 Données hydrographiques

Les données hydrographiques appliquées à ces simulations couvrent la Loire depuis le CNPE de Belleville sur Loire (PK Loire 0²) jusqu'à la ville de Saumur (PK Loire 285) et la Vienne depuis le CNPE de Civaux (PK Vienne 0) jusqu'à sa confluence avec la Loire (PK Vienne 120 et PK Loire 271) (Figure 2). Les différents CNPE présents sur ce domaine sont Belleville sur Loire (PK Loire 0), Dampierre en Burly (PK Loire 36), Saint Laurent des Eaux (PK Loire 133), Chinon (PK Loire 264) et Civaux (PK Vienne 0). La modélisation hydrographique du code CASTEAUR consiste à représenter le cours d'eau par une succession de biefs caractérisés par une longueur (km), une pente (m/m) et des sections trapézoïdales définies par leur positionnement dans le bief, leur largeur (m), leur angle de berges (°) et leur coefficient de Strickler (m^{1/3}/s). Pour la Loire et la Vienne ces paramètres sont issus de la base des données hydrographiques du code CASTEAUR ([9]). Nota : le paramétrage hydrographique de la Loire et la Vienne qui est détaillé ci-après a déjà été appliqué à une étude similaire réalisée dans le cadre du programme EMRAS de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique ([8]).

3.1.1 Données hydrographiques de la Loire

Les paramètres hydrographiques pour représenter la Loire entre le CNPE de Belleville et la ville de Saumur sont détaillés dans le tableau suivant.

² Les PK (Point Kilométrique) sont fournis en référence au point le plus amont du domaine de calcul (PK 0) qui sont le CNPE de Belleville sur Loire pour la Loire et le CNPE de Civaux pour la Vienne.

Tableau 1 : Paramètres hydrographiques de la Loire (rouge : rejets ; bleu : affluents)

| IDBief | Nom | PK entrant (km) | PK sortant (km) | Longueur (km) | Pente (m/m) | Largeur (m) | Angle Berge (°) | Strickler (m ^{0.33} /s) |
|--------|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-----------------|----------------------------------|
| 0 | Rejet_Belleville sur Loire | 0 | 17.5 | 17.5 | 5.10E-04 | 235 | 11.46 | 31.5 |
| 1 | Briare | 17.5 | 36.22 | 18.72 | 3.90E-04 | 200 | 8.02 | 31.5 |
| 2 | Rejet_Dampierre en Burlu | 36.22 | 48.72 | 12.5 | 5.30E-04 | 320 | 6.88 | 31.5 |
| 3 | Sully | 48.72 | 71.72 | 23 | 5.30E-04 | 290 | 7.45 | 31.5 |
| 4 | Ouvrouer | 71.72 | 91.72 | 20 | 5.80E-04 | 360 | 10.31 | 31.5 |
| 5 | Combleux | 91.72 | 100.71 | 8.99 | 4.20E-04 | 270 | 10.31 | 31.5 |
| 6 | Orléans_Discharge | 100.71 | 106.42 | 5.71 | 4.20E-04 | 270 | 10.31 | 31.5 |
| 7 | Confluence_Loiret | 106.42 | 115.92 | 9.5 | 3.40E-04 | 300 | 9.74 | 31.5 |
| 8 | Meung_sur_Loire | 115.92 | 130.92 | 15 | 5.30E-04 | 270 | 6.88 | 31.5 |
| 9 | Saint_Laurent_des_eaux | 130.92 | 133.48 | 2.56 | 5.30E-04 | 270 | 6.88 | 31.5 |
| 10 | Rejet_Saint_Laurent des Eaux | 133.48 | 144.48 | 11 | 5.30E-04 | 270 | 6.88 | 31.5 |
| 11 | Muides | 144.48 | 159.98 | 15.5 | 3.20E-04 | 330 | 9.17 | 31.5 |
| 12 | Blois | 159.98 | 173.98 | 14 | 4.60E-04 | 350 | 16.04 | 31.5 |
| 13 | Candé sur_Beuvron | 173.98 | 176.95 | 2.97 | 4.50E-04 | 360 | 10.89 | 31.5 |
| 14 | Onzain_Discharge | 176.95 | 182.98 | 6.03 | 4.50E-04 | 360 | 10.89 | 31.5 |
| 15 | Candé sur_Beuvron | 182.98 | 185.98 | 3 | 4.50E-04 | 360 | 10.89 | 31.5 |
| 16 | Montlouis_1 | 185.98 | 191.58 | 5.6 | 3.60E-04 | 300 | 9.74 | 31.5 |
| 17 | Montlouis_2 | 191.58 | 209.68 | 18.1 | 3.60E-04 | 300 | 9.74 | 31.5 |
| 18 | Montlouis_3 | 209.68 | 223.78 | 14.1 | 3.70E-04 | 230 | 8.02 | 31.5 |
| 19 | Tours | 223.78 | 235.37 | 11.59 | 3.80E-04 | 215 | 5.73 | 31.5 |
| 20 | Confluence_Le_Cher | 235.37 | 237.78 | 2.41 | 3.80E-04 | 215 | 5.73 | 31.5 |
| 21 | Langeais | 237.78 | 241.95 | 4.17 | 3.90E-04 | 282.5 | 8.02 | 31.5 |
| 22 | Langeais_discharge | 241.95 | 252.28 | 10.33 | 3.90E-04 | 350 | 8.02 | 31.5 |
| 23 | Port_Plat | 252.28 | 260.59 | 8.31 | 4.20E-04 | 410 | 9.17 | 31.5 |
| 24 | Confluence_Indre | 260.59 | 264.4 | 3.81 | 4.60E-04 | 310 | 6.88 | 31.5 |
| 25 | Rejet_Chinon | 264.4 | 271.21 | 6.81 | 4.60E-04 | 310 | 6.88 | 31.5 |
| 26 | Confluence_Vienne | 271.21 | 286.71 | 15.5 | 3.50E-04 | 430 | 18.33 | 31.5 |
| 27 | Saumur | 286.71 | 298.21 | 11.5 | 1.80E-04 | 510 | 12.61 | 31.5 |

3.1.2 Données hydrographiques de la Vienne

Les paramètres hydrographiques pour représenter la Vienne entre le CNPE de Civaux et sa confluence avec la Vienne sont détaillés dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Paramètres hydrographiques de la Vienne (rouge : rejets ; bleu : affluents)

| IDBief | Nom | PK entrant (km) | PK sortant (km) | Longueur (km) | Pente (m/m) | Largeur (m) | Angle Berge (°) | Strickler ($m^{0.33}/s$) |
|--------|-------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-----------------|----------------------------|
| 0 | Rejet Civaux | 0 | 15 | 15 | 5.00E-04 | 100 | 80 | 30 |
| 1 | | 15 | 24 | 9 | 5.00E-04 | 95 | 80 | 30 |
| 2 | | 24 | 29.5 | 5.5 | 5.00E-04 | 95 | 80 | 30 |
| 3 | | 29.5 | 43 | 13.5 | 4.00E-04 | 70 | 80 | 30 |
| 4 | | 43 | 46.5 | 3.5 | 3.00E-04 | 110 | 80 | 30 |
| 5 | Confluence Creuse | 46.5 | 51.8 | 5.3 | 3.00E-04 | 100 | 80 | 30 |
| 6 | | 51.8 | 61.9 | 10.1 | 2.50E-04 | 75 | 80 | 30 |
| 7 | | 61.9 | 72.9 | 11 | 2.00E-04 | 85 | 80 | 30 |
| 8 | | 72.9 | 92 | 19.1 | 1.00E-04 | 125 | 80 | 30 |
| 9 | | 92 | 102.7 | 10.7 | 8.00E-05 | 125 | 80 | 30 |
| 10 | | 102.7 | 112.4 | 9.7 | 1.00E-04 | 125 | 80 | 30 |
| 11 | Confluence Loire | 112.4 | 122 | 9.6 | 1.00E-04 | 125 | 80 | 30 |

3.2 Apports d'eau et calculs des débits

Cette section présente les chroniques des apports d'eau appliquées au modèle et les résultats de calculs des débits en Loire et en Vienne. Les chroniques d'apport d'eau sont déterminées aux stations « hydro » renseignées par la Banque-Hydro (www.hydro.eaufrance.fr). Elles sont obtenues en soustrayant la chronique de débit de la station à la chronique obtenue à cette même station par le calcul de la propagation des apports amont. Les stations « hydro » sont celles de Saint-Satur, Giens, Orléans, Blois, Onzain, Tours et Langeais pour la Loire et Monts pour l'Indre. Pour la Vienne, les stations sont celles de Civaux et de Chinon sur Vienne (Figure 4).

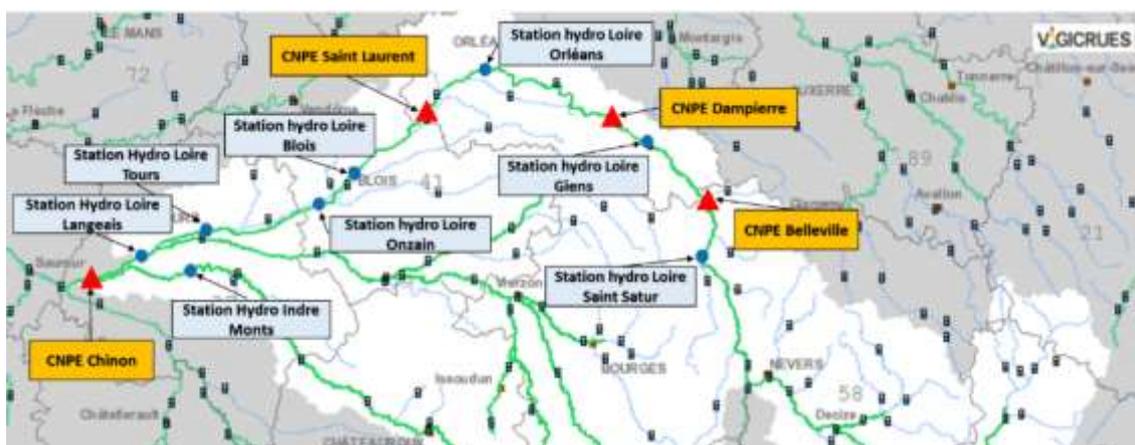


Figure 4 : Situation des stations hydrographiques (carte <https://www.vigicrues.gouv.fr> complétée IRSN)

3.2.1 En Loire

Aux différentes stations « hydro » de la Loire, les figures suivantes présentent les chroniques de débits extraites de la Banque Hydro, les débits calculés par le logiciel CASTEAUR à partir des apports amont, les chroniques d'apport déduites selon la méthode précitée et les chroniques de débit finalement calculées par le logiciel.

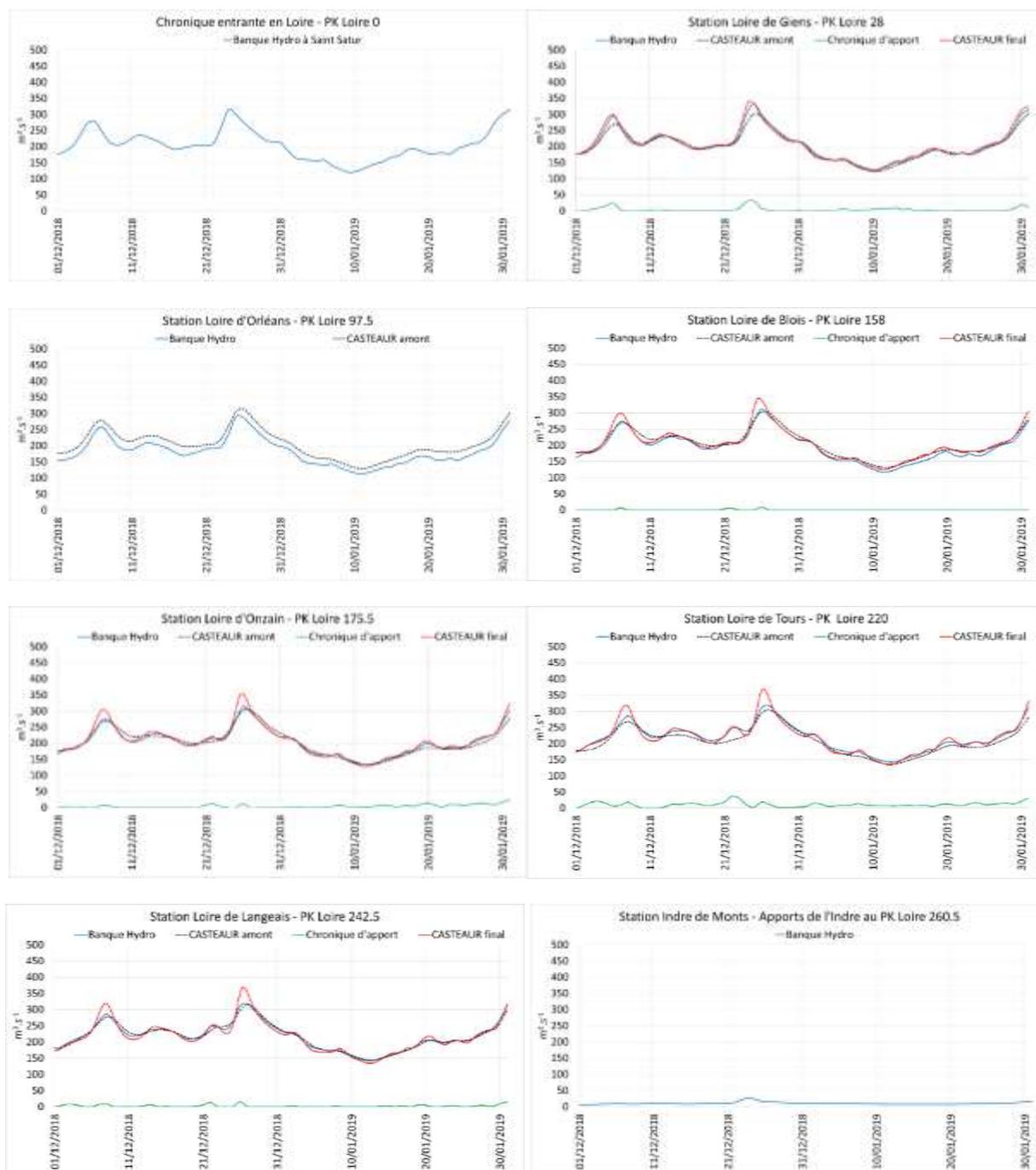


Figure 5 : Chroniques des débits en Loire entre décembre 2018 et janvier 2019

Les débits entrant dans le domaine d'étude au niveau du CNPE de Belleville sur Loire (PK Loire 0) sont attribués à la chronique extraite de la Banque Hydro à la station de Saint Satur. À la station d'Orléans (PK Loire 97.5), aucun apport de débit n'est pris en compte car la chronique calculée par CASTEAUR à partir des contributions amont donne des débits légèrement supérieurs à ceux de la Banque Hydro. La chronique d'apport de débit déterminée à la station de Blois (PK Loire 158), est attribuée au Loiret qui rejoint la Loire au PK 106.5. Pour cela, cette chronique d'apport est avancée d'une journée pour intégrer le temps moyen nécessaire au parcours de la cinquantaine de kilomètres qui sépare la confluence du Loiret et la station de Blois.

Les apports en débit de l'Indre, dont la confluence avec la Loire se situe juste en amont du CNPE de Chinon, est attribuée à la chronique renseignée par la Banque Hydro à la station de l'Indre à Monts.

A ces chroniques de débit il faut ajouter celle des apports de la Vienne à sa confluence avec la Loire au PK Loire 271. Cette chronique, présentée au paragraphe suivant, est déterminée par la modélisation des débits en Vienne au niveau de cette confluence.

3.2.2 En Vienne

Les figures suivantes présentent les chroniques de débits extraites de la Banque Hydro, les débits calculés par le logiciel CASTEAUR à partir des apports amont, les chroniques d'apport et les chroniques des débits finalement calculés par le logiciel aux stations « hydro » de la Vienne à Civaux et Chinon.

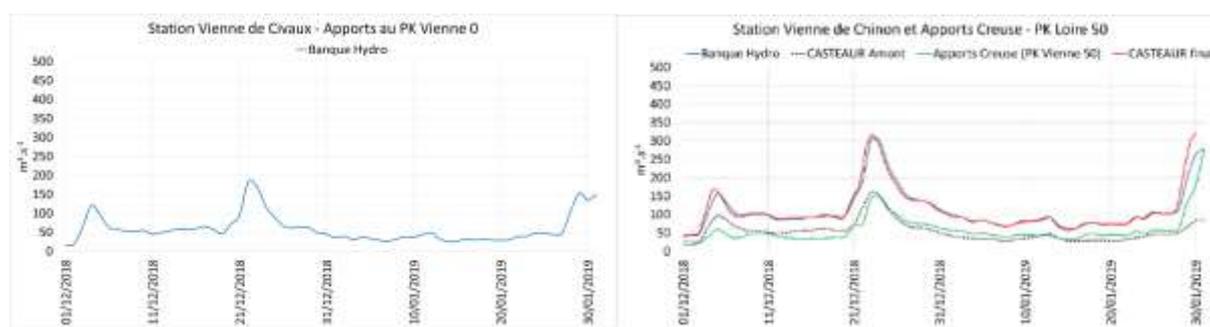


Figure 6 : Chroniques des débits en Vienne entre décembre 2018 et janvier 2019

L'augmentation du débit de la Vienne entre Civaux et Chinon sur la Vienne est attribuée aux apports de la Creuse qui rejoint la Vienne au PK Vienne 50.

La figure suivante présente la chronique des apports de débit de la Vienne à la Loire au PK Loire 271 calculée à partir de ces données.



Figure 7 : Chronique des apports de débit de la Vienne à la Loire entre décembre 2018 et janvier 2019

3.2.3 A Saumur

Afin de vérifier la modélisation des conditions de dilution à Saumur, la figure suivante présente les débits donnés par la station « hydro » de Saumur et les débits calculés en ce même point.

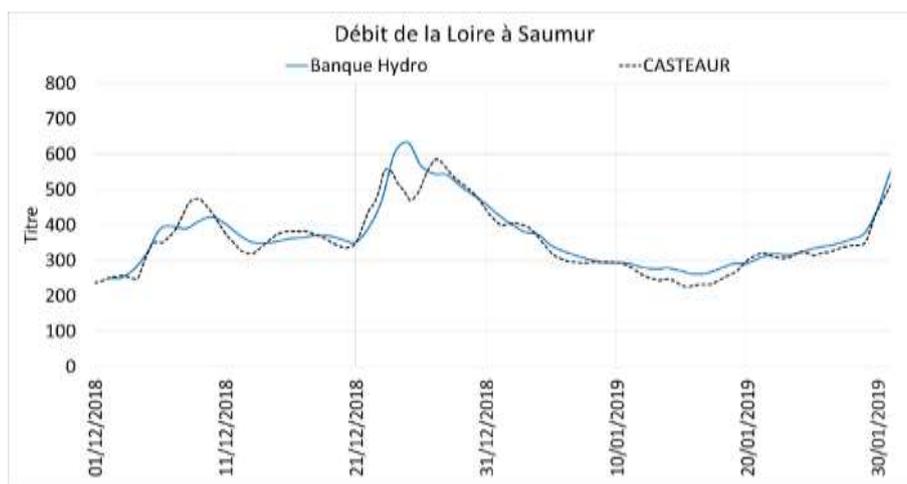


Figure 8 : Chroniques des débits de la Loire à Saumur de décembre 2018 à janvier 2019

3.3 Débits de rejet de tritium des CNPE

Les registres des rejets d'EDF pour les différents CNPE du bassin de la Loire entre décembre 2018 et janvier 2019 ont été transmis par l'ASN à l'IRSN aux fins de cette étude. Pour chaque rejet de chaque CNPE, ces registres indiquent un numéro d'effluent, la concentration en tritium de l'effluent (Bq.m³), le volume rejeté (m³) et la date et l'heure du début et de la fin du rejet. La prise en compte de ces rejets dans CASTEAUR implique de les associer à des débits d'activité en tritium (Bq.s⁻¹). Pour cela, la formulation suivante a été appliquée avec l'hypothèse que les débits de rejet sont constants sur la durée de chaque rejet :

$$q_{HTO} = \frac{V_{effluent} \cdot [HTO]_{effluent}}{Fin_{rejet} - Debut_{rejet}}$$

Avec q_{HTO} , débit de rejet d'activité en tritium (Bq.s⁻¹), $V_{effluent}$, volume d'effluent rejeté (m³), $[HTO]_{effluent}$, concentration en tritium de l'effluent (Bq.m⁻³), $Debut_{rejet}$, date, heure et minute de début du rejet et Fin_{rejet} , date, heure et minute de fin du rejet.

Les figures suivantes présentent ces chroniques pour les CNPE de Belleville sur Loire, Dampierre en Burly, Saint Laurent des Eaux, Chinon et Civaux au cours des mois de décembre 2018 et janvier 2019.





Figure 9 : Débits de rejet de tritium des CNPE de la Loire et de la Vienne entre décembre 2018 et janvier 2019

3.3.1 Chronique des apports de tritium en Loire des rejets du CNPE de Civaux

La chronique des apports en Loire du tritium rejeté par le CNPE de Civaux est obtenue par le calcul du transfert de ces rejets jusqu'à la confluence de la Vienne et de la Loire. Le graphique ci-dessous présente la chronique ainsi calculée des débits d'activité en tritium apportés par la Vienne au niveau de sa confluence avec la Loire.



Figure 10 : Chronique des apports de tritium de la Vienne dans la Loire

3.4 Paramètres de calcul

Les calculs en Vienne et en Loire ont été réalisés avec un pas d'espace de 250 m et un pas de temps de 30 minutes sur la période de décembre 2018 à janvier 2019.

3.5 Concentrations en tritium dans la Loire à Saumur en décembre 2018 et janvier 2019

La figure 11 présente la chronique calculée des concentrations en tritium de la Loire à Saumur pour les mois de décembre 2018 et janvier 2019. La figure présente la concentration totale, les contributions des différents CNPE amont et la mesure de l'ACRO du 21 janvier 2019 à 310 Bq.L⁻¹.

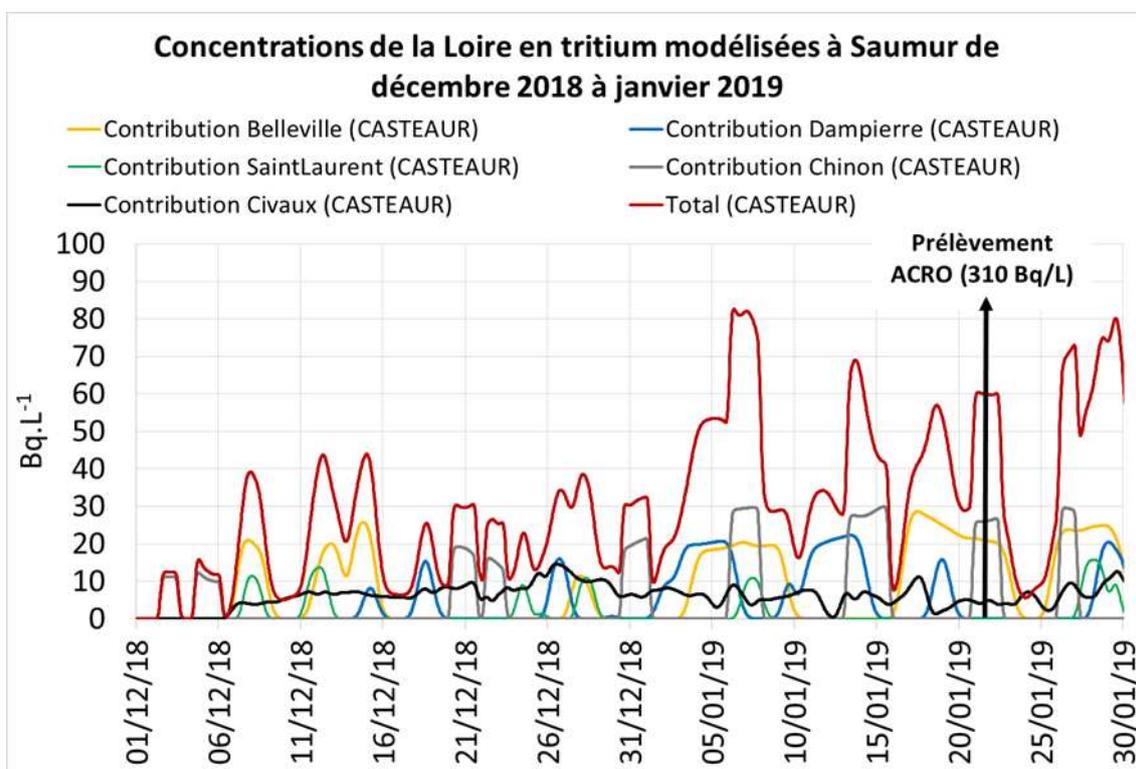


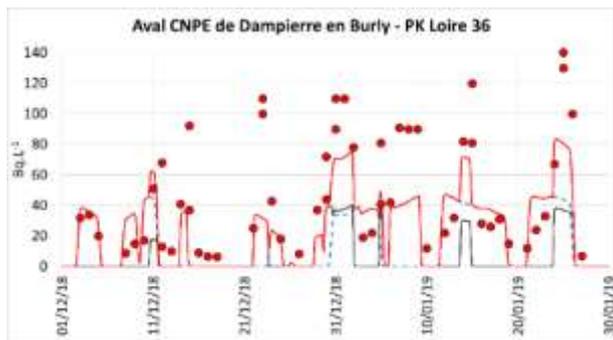
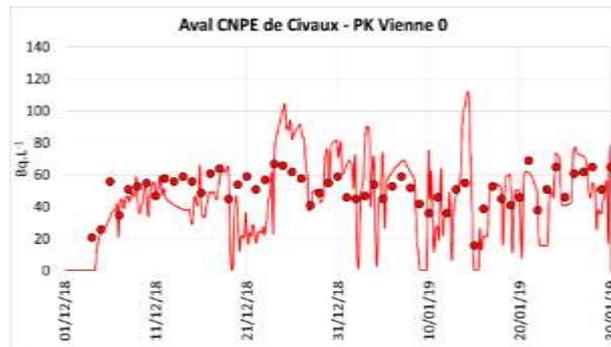
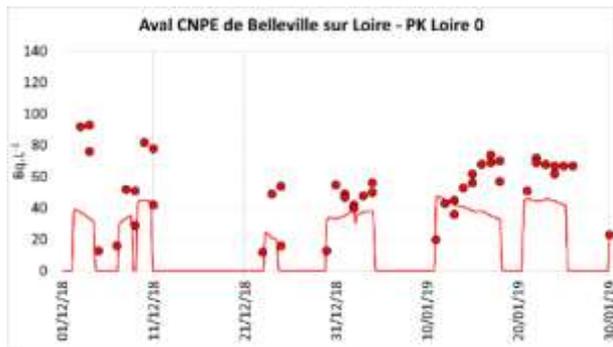
Figure 11 : Concentrations de la Loire en tritium modélisées à Saumur entre décembre 2018 et janvier 2019

Pour les mois de décembre 2018 et janvier 2019 et sous l'hypothèse de pleine homogénéisation, les concentrations de la Loire en tritium attendues à Saumur étaient comprises entre 8 et 80 Bq.L⁻¹. Compte tenu des conditions de débit, un niveau de 310 Bq.L⁻¹ aurait nécessité soit la superposition improbable des panaches d'une dizaine de rejets ou un événement d'un ordre de grandeur supérieur aux rejets habituels qui n'auraient pas été déclaré à l'ASN et pas détecté par la surveillance des CNPE amont.

Point à souligner : le prélèvement de l'ACRO du 21 janvier 2019 a été réalisé dans un panache cumulant des rejets des CNPE de Belleville sur Loire, de Civaux et de Chinon.

3.6 Concentrations en tritium dans la Loire à l'aval des CNPE

Cette section présente les concentrations en tritium calculées à l'aval des CNPE de Belleville sur Loire, Dampierre en Burly, Saint Laurent des Eaux, Chinon et Civaux et leur comparaison aux données de la surveillance d'EDF effectuée à mi-rejet, à l'aval de ces mêmes installations (données du RNM). Chaque figure présente les calculs des concentrations totales (courbe rouge), des contributions amont (tirets bleu), du CNPE (courbe noire) et les données de la surveillance d'EDF (points rouges).



- Surveillance EDF
- Contribution du CNPE
- Total (CASTEAUR)
- - Contribution des CNPE amonts

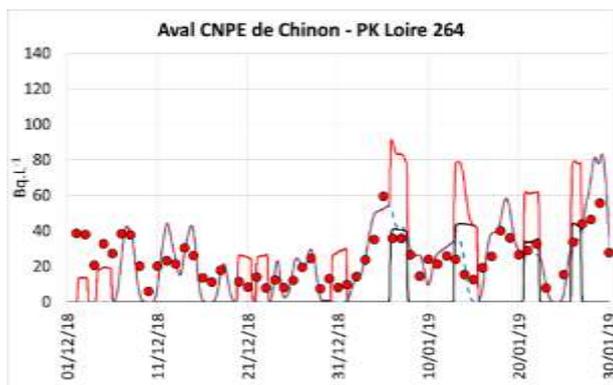
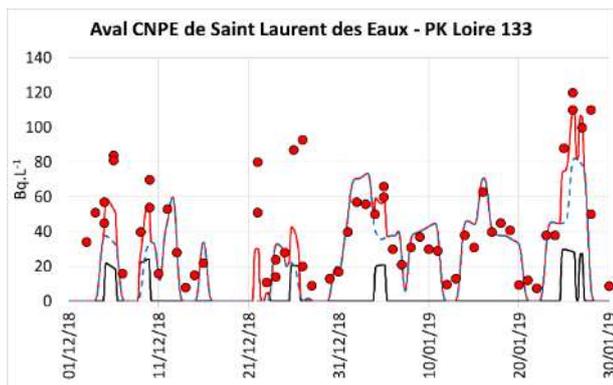


Figure 12 : Concentrations en tritium à l'aval des CNPE entre décembre 2018 et janvier 2019

A l'aval des CNPE de Belleville sur Loire, Dampierre en Burly et Saint Laurent des Eaux, les données de la surveillance révèlent des concentrations équivalentes ou plus élevées que celles obtenues par calcul pour des conditions de bon mélange (CBM). Cette observation laisse à penser que les prélèvements de la surveillance à l'aval de ces CNPE sont bien effectués dans le panache des rejets mais pas toujours en zone de bon mélange.

A la station de surveillance de Civaux, l'accord entre les calculs et les données de la surveillance est globalement correct. Cependant, les concentrations modélisées qui sont supérieures aux données de la surveillance à la fin du mois de décembre 2018 indiquent que la surveillance aval n'est pas toujours en zone de bon mélange.

Les résultats sont plus complexes à l'aval du CNPE de Chinon :

- 1) en l'absence de rejet de ce CNPE, les concentrations calculées sont en bon accord avec les mesures de la surveillance,
- 2) en cas de rejet de ce CNPE, les concentrations calculées sont supérieures à celles de la surveillance qui reproduit le signal des contributions des CNPE amont.

Pour la période de décembre 2018 à janvier 2019, ces résultats indiquent que les rejets de Chinon ne sont pas homogénéisés au niveau de la station de surveillance aval qui détecte principalement les rejets des installations amont.

3.7 Interprétation des données de la surveillance à l'aval du CNPE de Chinon

Pour conforter les résultats précédents par une autre approche que la modélisation, cette section présente la comparaison entre les données de la surveillance aval du CNPE de Saint Laurent des Eaux, le dernier CNPE en amont de Chinon, et les données de la surveillance aval du CNPE de Chinon. Le principe est que le signal de la surveillance aval du CNPE de Chinon doit cumuler les contributions des rejets du CNPE de Chinon et du signal de la surveillance aval du CNPE de Saint Laurent des Eaux décalé du temps de transit et dilué de l'augmentation du débit de la Loire entre ces deux CNPE. Pour cela, le signal de la surveillance aval du CNPE de Saint Laurent des Eaux est avancé d'une journée et dilué de 10% (temps de transit et taux de dilution moyens entre les deux CNPE). La figure suivante présente la comparaison de ce « signal modifié » aux données de la surveillance aval de Chinon et aux résultats de la modélisation.

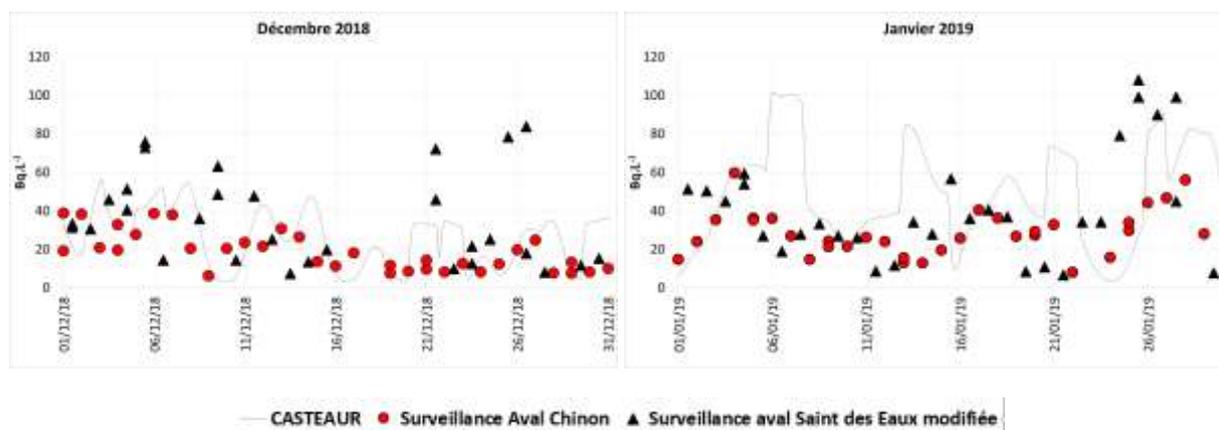


Figure 13 : Surveillance aval du CNPE de Chinon vs surveillance aval modifiée du CNPE de Saint Laurent des Eaux

La détection des rejets du CNPE de Chinon par sa station de surveillance aval implique que les concentrations à cette station soient supérieures à celles du « signal modifié » de la surveillance à l'aval du CNPE de Saint Laurent des Eaux. Pour les mois de décembre 2018 et janvier 2019, la figure précédente montre que ce n'est jamais le cas et que la surveillance aval du CNPE de Chinon reproduit assez fidèlement le « signal modifié » de la surveillance aval du CNPE de Saint Laurent des Eaux.

Les « concentrations modifiées » de la surveillance aval du CNPE de Saint Laurent des Eaux sont parfois plus élevées que les valeurs modélisées et mesurées à l'aval du CNPE de Chinon. Ces valeurs doivent être interprétées au regard des variations du taux de dilution entre les deux CNPE qui, comme le montre la comparaison avec le signal modélisé, est parfois inférieur au taux moyen de 10% qui a été appliqué.

En l'état, ces résultats recourent ceux de la modélisation et confortent l'analyse selon laquelle la station de surveillance aval du CNPE de Chinon n'aurait pas détecté tous les rejets émis par ce CNPE durant les mois de décembre 2018 et janvier 2019, vraisemblablement du fait d'une inhomogénéité de dilution du tritium dans le fleuve au PK de la station de prélèvement.

3.8 Conclusions préliminaires

Pour la période d'observation (de décembre 2018 à janvier 2019), l'étude a permis de mettre en évidence que :

1. sous l'hypothèse de bon mélange, il n'est pas possible d'atteindre à Saumur une concentration de 310 Bq.L^{-1} au mois de janvier 2019, sauf à envisager la superposition improbable des panaches d'une dizaine de rejets ou l'occurrence d'un évènement non déclaré et non détecté d'une amplitude dix fois supérieur aux rejets habituels ;
2. l'homogénéisation des concentrations consécutives aux rejets du CNPE de Chinon n'est pas totale au niveau de sa station de surveillance aval. En conséquence, des concentrations inhomogènes sont également attendues à l'aval de cette station (avec des niveaux au-delà et en deçà des CBM) ;
3. le prélèvement de l'ACRO du 21 janvier 2019 a été réalisé dans un panache cumulant les rejets des CNPE de Chinon, de Belleville-sur-Loire et de Civaux. Le rejet de Chinon est vraisemblablement celui qui détermine le plus l'hétérogénéité de dilution du tritium à Saumur.

Pour consolider ces hypothèses, l'IRSN a jugé utile d'étendre la durée d'observation (§ 4 ci-après).

4 ETUDE COMPLEMENTAIRE DE MAI 2018 A MAI 2019

L'objectif de ce chapitre est de modéliser sur une année complète (entre mai 2018 et mai 2019) les concentrations de tritium dans la Loire à partir des données issues des registres de rejets des CNPE du bassin versant et de mettre au regard du résultat des calculs, les données de surveillance aval du CNPE de Chinon, celui-ci étant le plus susceptible de générer une hétérogénéité de distribution du tritium au niveau de la commune de Saumur. La méthode utilisée et les sources de données d'entrée sont les mêmes que celles de l'étude réalisée entre décembre 2018 et janvier 2019.

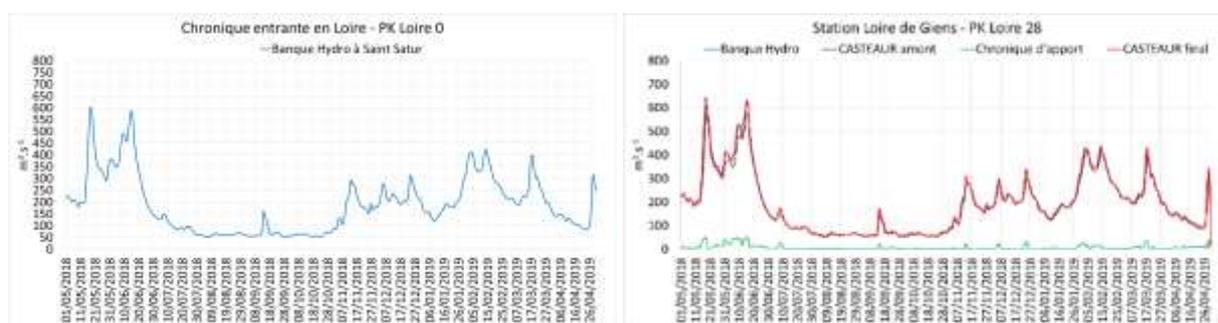
Le chapitre présente les données et les paramètres de calculs, la comparaison des calculs aux données de la surveillance à l'aval du CNPE de Chinon, la vérification des résultats par la comparaison direct des données de la surveillance aux avals des CNPE de Saint Laurent des Eaux et de Chinon et les conclusions sur l'interprétation de la mesure de l'ACRO du 21 janvier 2019.

4.1 Données hydrographiques

Les données hydrographiques appliquées à ces simulations couvrent la Loire depuis le CNPE de Belleville sur Loire (PK Loire 0) jusqu'à la station de surveillance aval du CNPE de Chinon (PK Loire 269). Les CNPE pris en compte sont Belleville sur Loire (PK Loire 0), Dampierre en Burlay (PK Loire 36), Saint Laurent des Eaux (PK Loire 133) et Chinon (PK Loire 264) et les paramètres hydrographiques appliqués à ce domaine sont identiques à ceux du chapitre précédent (cf. Tableau 1).

4.2 Apports d'eau et calculs des débits

Cette section présente les chroniques d'apports des débits en Loire appliquées au logiciel CASTEAUR et les résultats de calcul des débits. Avec la même méthode que celle appliquée au chapitre précédent, les chroniques en Loire sont déterminées à partir des données de la Banque Hydro disponibles aux stations de Saint Satur, Giens, Orléans, Blois, Onzain, Tours et Langeais pour la Loire et Monts pour l'Indre. A ces différentes stations, les figures suivantes indiquent les chroniques de débits extraites de la Banque Hydro, les débits calculés par CASTEAUR à partir des apports amont, les chroniques d'apport déduites selon la méthode précitée et les chroniques des débits finalement calculés par le logiciel.



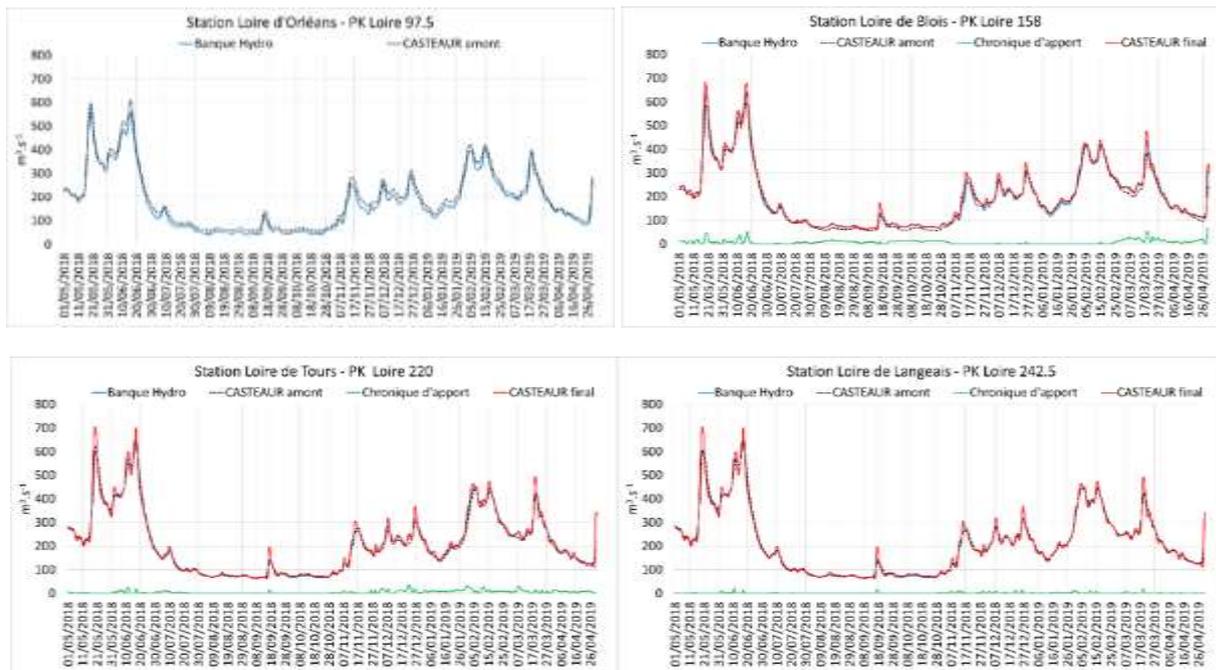


Figure 14 : Chroniques des débits de la Loire entre mai 2018 et mai 2019

Ces résultats appellent les mêmes commentaires que ceux du chapitre précédent (cf.3.2.1). En complément, la figure suivante correspond à la chronique des apports de débit de l'Indre donnée à la station de Monts par la Banque Hydro.

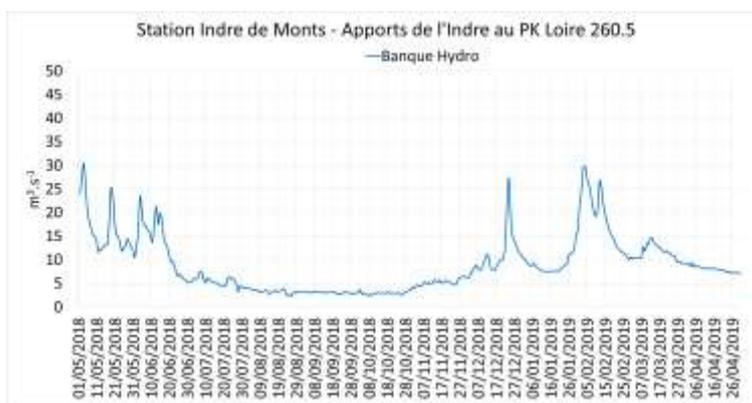


Figure 15 : Chronique des apports de l'Indre (PK 260.5)

4.3 Débits de rejets de tritium des CNPE

Les chroniques des débits de rejet de tritium de mai 2018 à mai 2019 des CNPE du bassin versant sont déterminées à partir des registres de rejet d'EDF transmis à l'IRSN par l'ASN et selon la même méthode que celle utilisée au chapitre précédent (Figure 16).

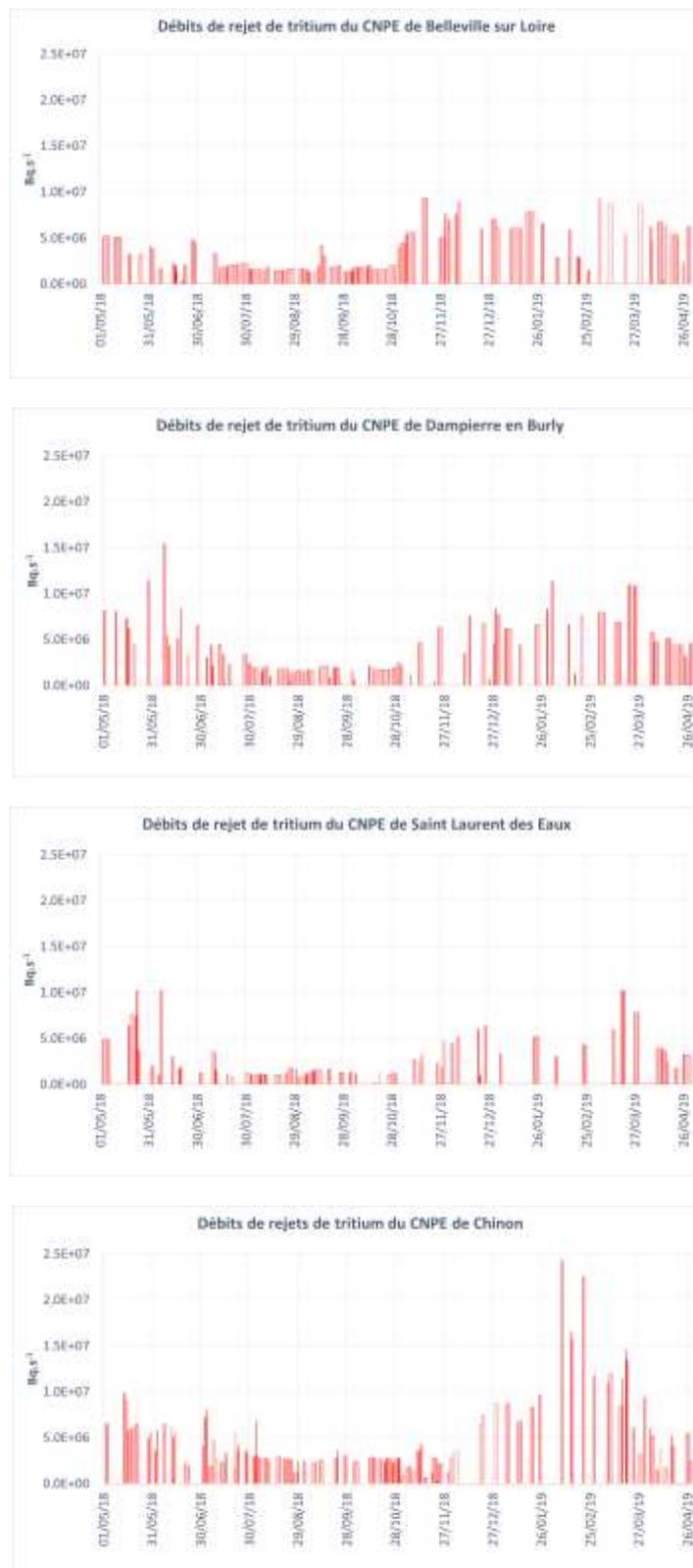


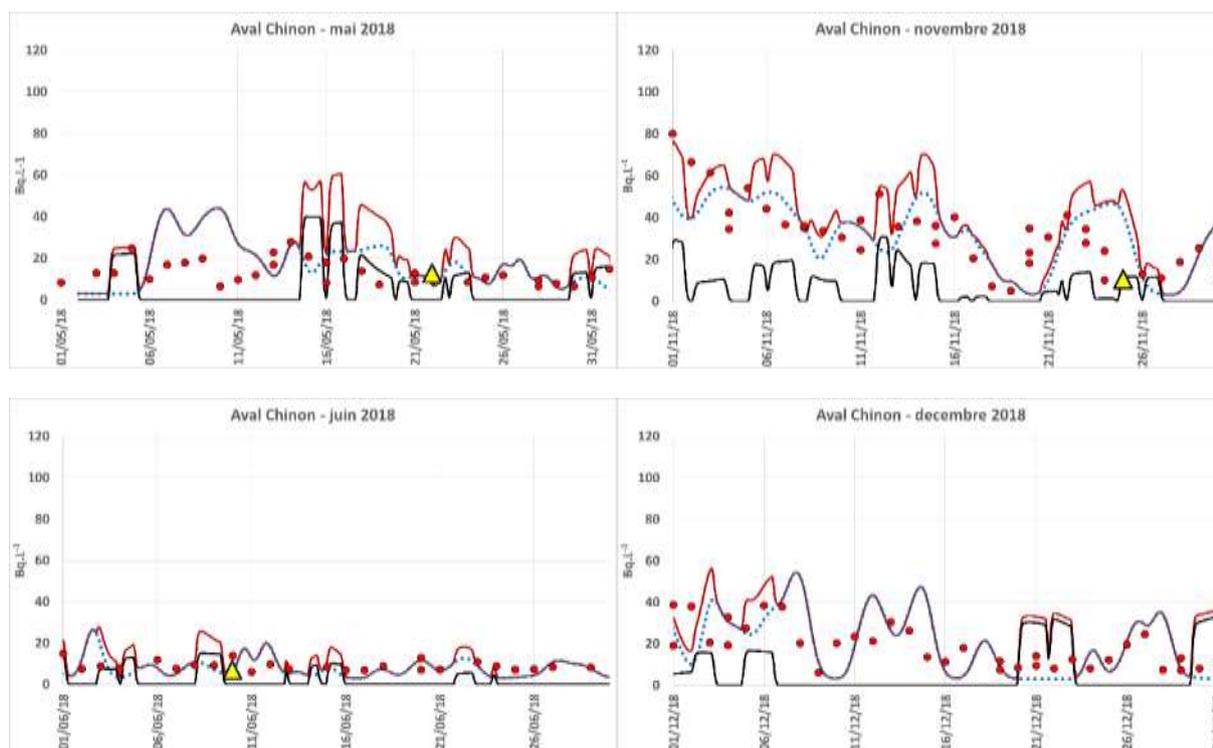
Figure 16 : Débits de rejet de tritium des CNPE de la Loire entre mai 2018 et mai 2019

4.4 Paramètres de calcul

Sur la période de mai 2018 à mai 2019 les calculs ont été réalisés avec la même résolution en espace et en temps que l'étude précédente : pas d'espace = 250 m et pas de temps = 30 minutes.

4.5 Concentrations de tritium à la station de surveillance aval du CNPE de Chinon

La figure suivante présente les concentrations en tritium modélisées au niveau de la station de surveillance aval du CNPE de Chinon, les contributions modélisées des rejets des CNPE amont, les contributions modélisées des rejets du CNPE de Chinon, les données de la surveillance à la station. A titre d'information, cette figure présente également les mesures effectuées par l'ACRO à Saumur ([10]), 12 km en aval et après la confluence de la Loire et de la Vienne. Pour la comparaison aux données de la surveillance et de la modélisation à l'aval du CNPE de Chinon, il faut bien considérer que ces mesures tiennent compte, en théorie, des contributions des rejets du CNPE de Civaux (quelques Bq.L⁻¹, Figure 11) et de la dilution apportée par la Vienne qui est en moyenne de 10%.



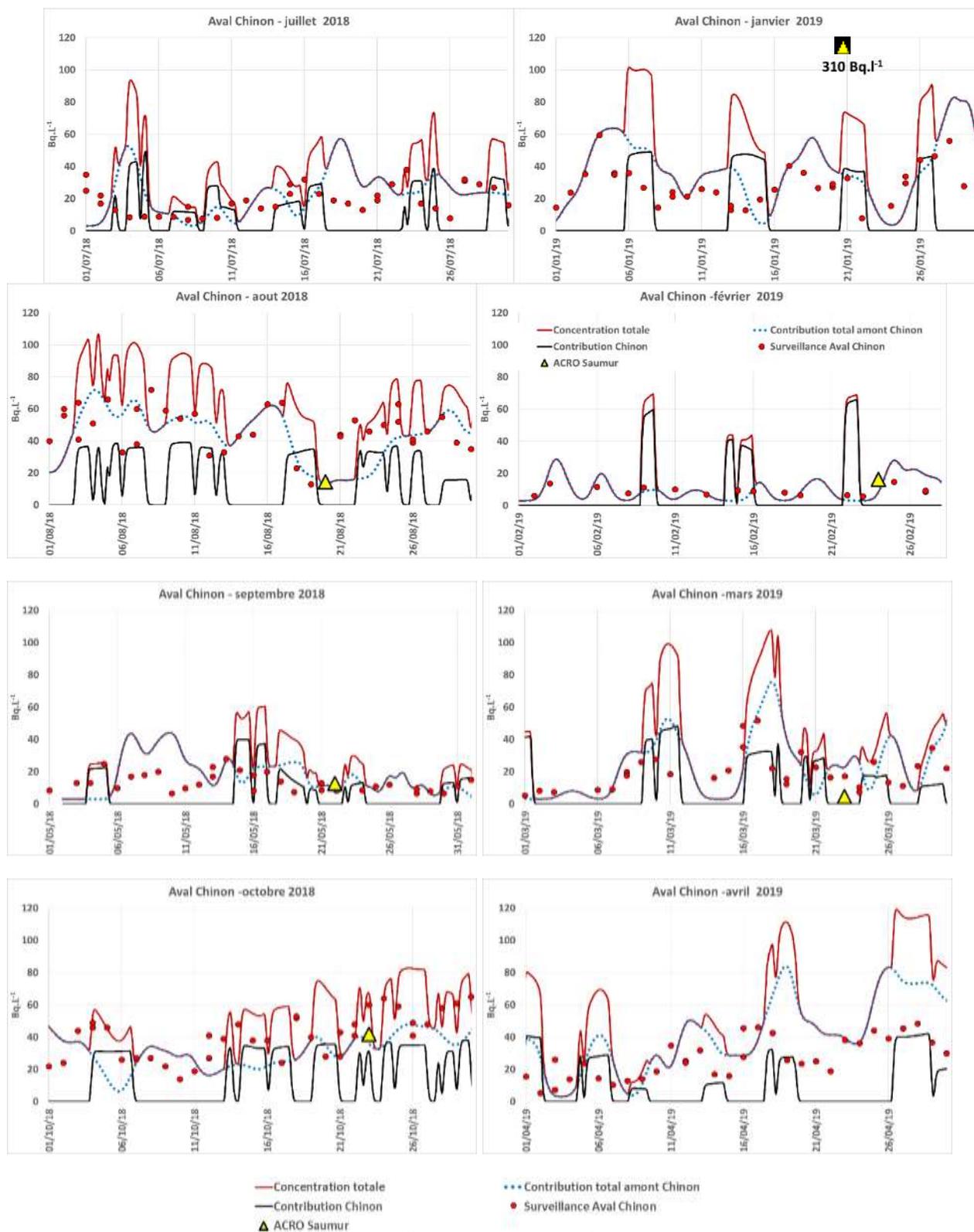


Figure 17 : Concentrations en tritium de la Loire à la station aval du CNPE de Chinon entre mai 2018 et mai 2019 (mesure de l'ACRO du 21/01/2019 hors échelle du graphe)

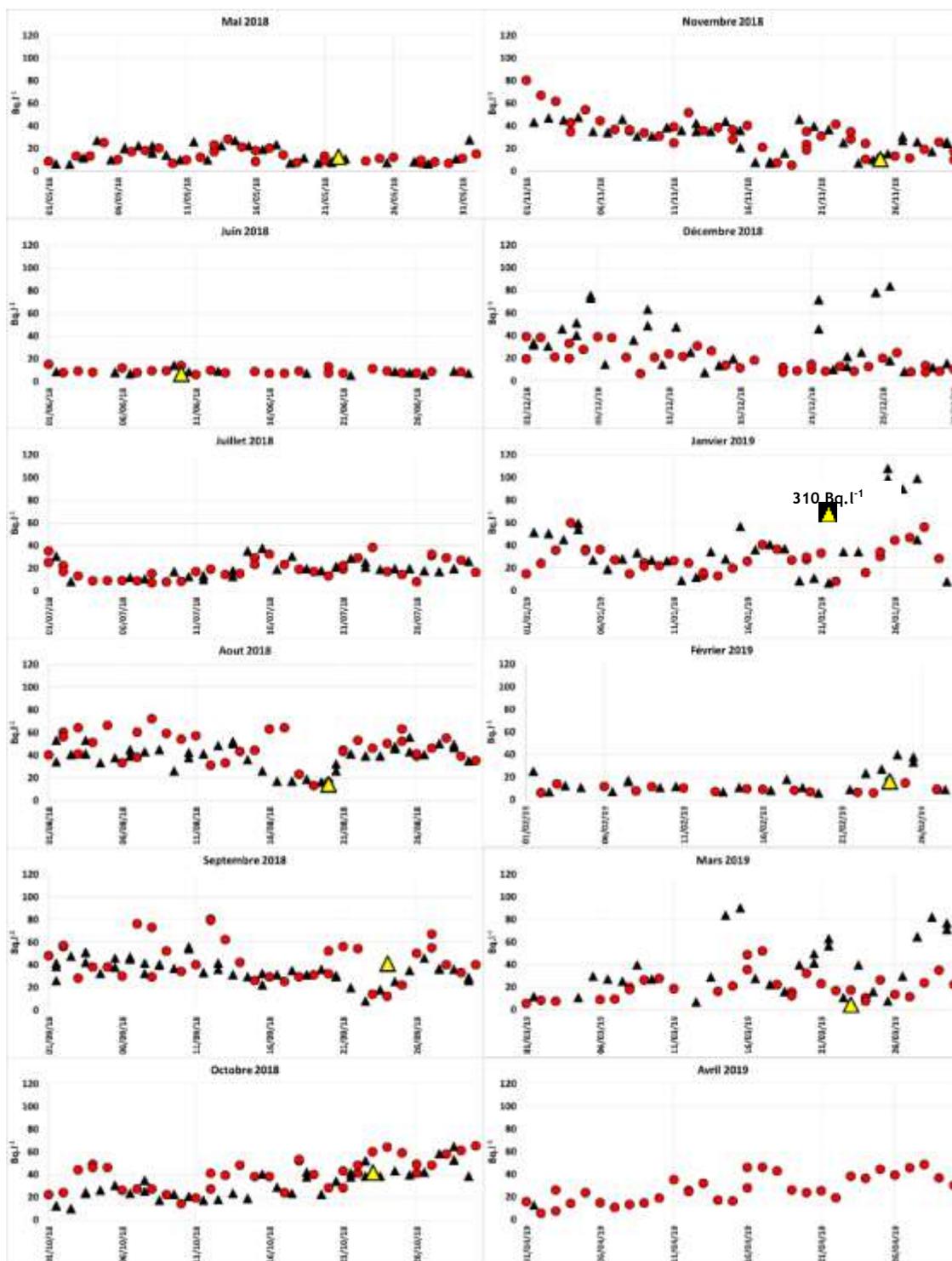
Les concentrations de tritium mesurées à la station de surveillance aval du CNPE de Chinon lors du passage d'un rejet de ce CNPE sont supérieures à celles attendues du fait du rejet des CNPE amont de mi-août 2018 à mi-novembre 2018. En dehors de cette période, les données de la surveillance correspondent aux contributions des rejets des CNPE amont, avec parfois des valeurs significativement plus basses (6-11/05/2018 ; début et mi-juillet 2018 ; fin avril 2019).

Bien qu'elles cumulent les contributions des rejets du CNPE de Civaux et la dilution apportée par les eaux de la Vienne, on constate que les mesures réalisées par l'ACRO à Saumur sont globalement en accord avec les données de la surveillance et la modélisation à l'aval du CNPE de Chinon. Les principaux écarts sont observés pour la mesure du 23 mars 2019 qui indique une valeur plus basse et celle du 21 janvier 2019 à 310 Bq.L⁻¹, beaucoup plus élevée, mais réalisée concomitamment au passage d'un rejet du CNPE de Chinon³.

4.6 Comparaison des données de la surveillance aval des CNPE de Saint Laurent des Eaux et de Chinon

La figure suivante présente la comparaison des données de la surveillance aval des CNPE de Chinon et de Saint Laurent des Eaux, ces dernières étant retardées d'une journée et diluées de 10% pour intégrer le transfert moyen entre ces deux CNPE (cf. 3.7). Les mesures de l'ACRO réalisées à Saumur sur la même période sont également positionnées.

³ La mesure faite par l'ACRO sur le prélèvement du 23 mars 2019 révèle un niveau de tritium un peu faible au regard de la concentration attendue.



▲ Surveillance corrigée aval Saint Laurent ● Surveillance aval Chinon ▲ ACRO Saumur

Figure 18 : Comparaison entre les données de la surveillance aval des CNPE de Saint Laurent des Eaux et de Chinon (mesure de l'ACRO du 21/01/2019 hors échelle du graphe)

Les niveaux de tritium mesurés à la station aval du CNPE de Chinon sont supérieurs à ceux mesurés à l'aval du CNPE de Saint Laurent des Eaux, de fin juillet 2018 à début novembre 2018. En dehors de cette période, ils sont soit identiques, soit inférieurs. Ainsi, sur la période de mai 2018 à mai 2019, les rejets du CNPE de Chinon ont été détectés par sa surveillance aval de fin juillet 2018 à début novembre 2018. En dehors de cette période, les mesures effectuées à cette station sont essentiellement représentatives des contributions des CNPE amont.

Ces résultats confortent les précédentes hypothèses, à savoir que l'homogénéisation des concentrations en Loire des rejets liquides du CNPE de Chinon n'est pas atteinte en toutes circonstances au niveau de sa station de surveillance aval. En conséquence, il est fortement pressenti que la mesure du 21 janvier 2019 traduise la persistance jusqu'à Saumur de concentrations de tritium hétérogènes consécutives aux rejets liquides du CNPE de Chinon.

5 CONCLUSIONS

Cette étude fait suite à la détection d'une concentration en tritium de 310 Bq.L^{-1} mesurée dans un prélèvement d'eau de la Loire effectué par l'ACRO le 21 janvier 2019 au niveau du pont Cessart à Saumur ([10]). Son objectif est de vérifier si la propagation en Loire des rejets des CNPE du bassin de la Loire peut être à l'origine de cette mesure qui est nettement supérieure aux valeurs habituellement observées dans ce fleuve. Elle s'appuie sur le croisement des données de la surveillance à l'aval des CNPE et d'une modélisation monodimensionnelle de la propagation dans la Loire et la Vienne des rejets de tritium effectués par les CNPE de Belleville sur Loire, Dampierre en Burly, Saint Laurent des Eaux, Chinon et Civaux.

Une première phase de l'étude, focalisée sur la période de détection du niveau de 310 Bq.L^{-1} par l'ACRO (de décembre 2018 à janvier 2019), montre que sous l'hypothèse de bon mélange, les rejets des différents CNPE du bassin de la Loire ne permettent pas d'atteindre une concentration de 310 Bq.L^{-1} au mois de janvier 2019 à Saumur. Pour atteindre un tel niveau en condition de bon mélange, il faudrait soit la superposition simultanée et improbable d'une dizaine de panaches de rejets, 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 de l'ACRO du 21 janvier 2019 a été réalisé dans le panache d'un rejet du CNPE de Chinon et que les concentrations de tritium consécutives aux rejets de ce CNPE n'étaient pas homogènes au niveau de sa station de surveillance située 5 km en aval.

Dans un second temps, 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 nouvelle étude confirme que les rejets du CNPE de Chinon peuvent ne pas être homogènes au niveau de sa station de surveillance aval (située à 5 km du point de rejet). 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, qui a été réalisée dans le panache d'un rejet du CNPE de Chinon.

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

Liste des références

- [1] Boyer, P., Beaugelin-Seiller, K. (2002). CASTEAUR: a tool for operational assessments of radioactive nuclides transfers in river ecosystems. *Radioprotection - Colloques*, 37(C1), pp. 1127-1131.
- [2] Beaugelin-Seiller K., Boyer, P., Garnier-Laplace, J., Adam, C. (2002). CASTEAUR: a simple tool to assess the transfer of radionuclides in waterways. *Health Physics*, 84(3), pp. 539-542.
- [3] Duchesne, S., Boyer, P., Beaugelin-Seiller, K. (2003). Sensitivity and uncertainty analysis of a model computing radionuclides transfers in fluvial ecosystems (CASTEAUR): application to ¹³⁷Cs accumulation in chubs. *Ecological modelling*, 166, pp. 257-276.
- [4] Boyer, P., Beaugelin-Seiller, K., Ternat, F., Anselmet, F., Amielh, M. (2005). A dynamic box model to predict the radionuclide behaviour in rivers for medium and long-term periods. *Radioprotection, Suppl.* 1, 40, pp. 307-313.
- [5] Monte, L., Boyer, P., Brittain, J.E., Goutal, N., Heling, R., Kryshev, A., Kryshev, I., Laptev, G., Luck, M., Perianez, R., Siclet, F., Zheleznyak, M. (2008). Testing models for predicting the behaviour of radionuclides in aquatic systems. *Applied Radiation and Isotopes*, 66, pp. 1736-1740.
- [6] Kryshev, I.I., Boyer, P., Monte, L., Brittain, J.E., Dzyuba, N.N., Krylov, A.L., Kryshev, A.I., Nosov, A.V., Sanina, K.D., Zheleznyak, M.I. (2009). Model testing of radioactive contamination by ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu of water and bottom sediments in the Techa River (Southern Urals, Russia). *Science of the Total Environment*, 407(7), pp. 2349-2360.
- [7] Gagnaire, B., Boyer, P., Bonzom, J.M., Lecomte-Pradines, C., Simon, O., Gilbin, R. (2011). Transfer modelling and toxicity evaluation of the effluent from an installation of cleansing and uranium recovery using a battery of bioassays. *Ecotoxicology*, 20, pp. 187-201.
- [8] Goutal N., Luck M., Siclet F., Monte L., Angeli G., Boyer P., Zheleznyak M. (2007). Intercomparisons of operational models for predicting tritium migration from routine discharges of Nuclear Power Plants: the case of the Loire River. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 367-382.
- [9] Beaugelin-Seiller K. (2004). Catalogue des données « hydrosystèmes » acquises pour l’outil CASTEAUR. Rapport DEI/SECRE n° 2004-004.
- [10] ACRO (2019). Observatoire Citoyen de la Radioactivité autour des installations nucléaires de la Loire et de la Vienne - Bilan des résultats - Période décembre 2017- Mai 2019. RAP190530(01)-OCR_LoireetVienne-v1.0.