



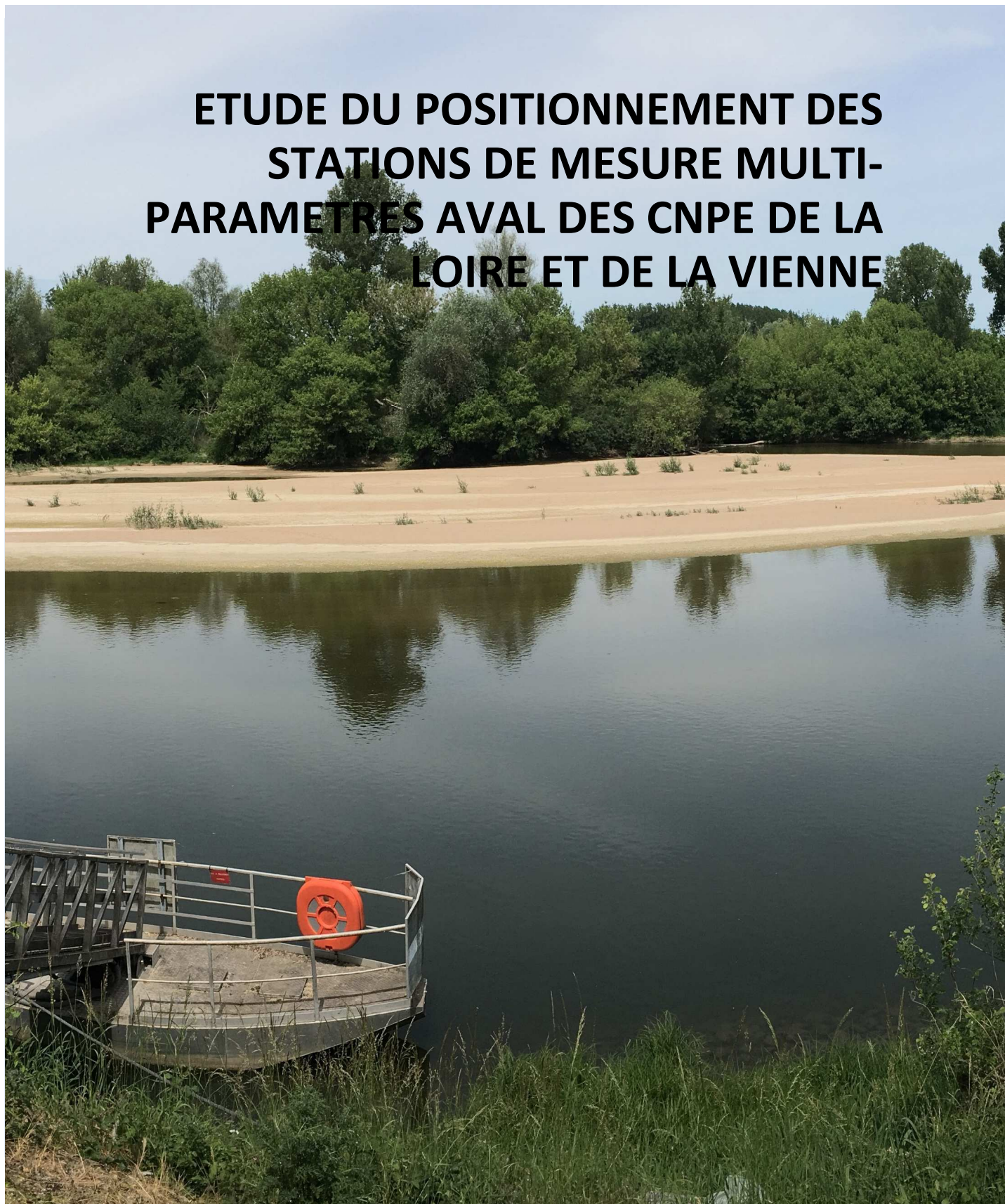
**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

ETUDE DU POSITIONNEMENT DES STATIONS DE MESURE MULTI- PARAMETRES AVAL DES CNPE DE LA LOIRE ET DE LA VIENNE



ETSON

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 télé-surveillance 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

Une activité volumique de tritium nettement plus élevée que celles habituellement observées dans le cadre de la surveillance, a été mesurée par l'ACRO dans un prélèvement d'eau effectué dans la Loire au pont Cessart à Saumur en janvier 2019. Afin d'évaluer la reproductibilité de cette mesure, l'IRSN a réalisé, entre 2020 et 2021, une campagne de prélèvements et de mesures spécifiques associée à des modélisations de la dispersion des rejets liquides des cinq Centres Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE) du bassin de la Loire [1].

Au cours de cette étude, les activités volumiques de tritium ont été modélisées sur la période de 2019 à 2021 au fil du réseau hydrographique constitué de la Loire et de la Vienne, depuis les CNPE de Belleville sur Loire et Civaux jusqu'à Saumur, à partir des rejets déclarés par EDF pour les cinq CNPE et des données de débit de la Loire et de ses principaux affluents. Ces modélisations ont été comparées aux activités volumiques mesurées par l'IRSN pendant cette campagne au pont Cessart à Saumur et à celles issues de la surveillance de l'environnement réalisée par EDF à partir de prélèvements effectués au moyen des stations de mesure multi-paramètres (SMP) situées en aval des CNPE.

Si cette étude n'a pas permis d'expliquer le niveau atypique atteint en janvier 2019, elle a, en revanche, mis en évidence que les prélèvements réalisés à la SMP située en aval de Chinon n'étaient pas systématiquement (en fonction des débits de la Loire) représentatifs des rejets du CNPE en raison de son positionnement. Ce constat a alors soulevé des interrogations sur le positionnement des autres SMP aval des CNPE de la Loire et de la Vienne.

Dans ce contexte, l'objectif de cette nouvelle étude est de vérifier que les SMP situées en aval des CNPE de la Loire et de la Vienne sont correctement positionnées pour fournir des échantillons dont les activités volumiques de tritium mesurées sont représentatives de l'activité moyenne en tritium ajoutée par les rejets du CNPE surveillé.

Pour y répondre, les activités volumiques de tritium mesurées par EDF dans les échantillons prélevés entre janvier 2017 et avril 2021 au moyen des SMP aval, ont été comparées à celles obtenues par modélisation en utilisant les outils de calcul de l'IRSN à partir des chroniques de rejets, déclarées par EDF à l'ASN, et des conditions de débit des cours d'eau sur cette période et ceci pour chacun des cinq CNPE des bassins versants de la Loire et de la Vienne.

L'évaluation de la représentativité des SMP aval, s'est faite en utilisant principalement deux indicateurs : 1) pour repérer les éventuelles défaillances dans la détection par la SMP des rejets du CNPE, on s'est intéressé aux échantillons, prélevés par la SMP et pour

lesquels l'activité volumique du tritium était trop faible pour être mesurée alors que le modèle prévoyait une activité volumique de tritium mesurable (> 5 Bq/L). De telles situations pouvant traduire soit un problème de modélisation, soit être le signe d'un mauvais positionnement de la SMP, leurs fréquences et leurs causes ont été étudiées ; 2) pour vérifier que les échantillons fournis par la SMP sont bien prélevés dans la partie du cours d'eau où circule l'essentiel du tritium rejeté par le CNPE, appelée « veine des rejets », on s'est intéressé au rapport entre les activités volumiques de tritium mesurées et celles attendues par modélisation. Il a été considéré que si ce rapport est égal ou supérieur à 1, cela signifie que les prélèvements sont bien effectués dans la veine des rejets du CNPE surveillé et que les activités volumiques mesurées dans les échantillons rendent bien compte des activités circulant dans le cours d'eau ; ces activités volumiques peuvent alors être comparées aux activités maximales prescrites dans la réglementation en présence de rejets radioactifs du CNPE surveillé.

Les résultats de l'analyse de la représentativité des SMP aval réalisée au regard de ces deux indicateurs, pour toutes les gammes de débits du fleuve entre janvier 2017 et avril 2021, sont présentés ci-après pour chaque CNPE.

Les rejets liquides du CNPE de Belleville sont toujours détectés dans les échantillons d'eau de la Loire prélevés au moyen de sa SMP située en aval, qui, bien que positionnée avant la zone de mélange homogène des rejets, prélève bien dans la « veine des rejets » et permet des mesures représentatives des rejets du CNPE lorsque les deux clarinettes de rejet sont utilisées.

Il en est de même pour une majorité des situations, pour la SMP située en aval du CNPE de Dampierre-en-Burly. Toutefois, l'étude a révélé un problème de détection et de représentativité sur la période allant de février à novembre 2017 qui pourrait résulter de la concomitance de deux événements : 1) le rejet des effluents liquides par une seule des deux clarinettes de rejet, la plus éloignée de la rive où se situe la SMP aval, et 2) le dépôt, en berge en aval immédiat des rejets, des sédiments dragués dans le canal d'amenée du CNPE, qui a pu contribuer à éloigner la veine de rejet de la SMP aval.

Depuis le déplacement, en 2018, du point de prélèvement de la SMP située en aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux à 70 m de la berge gauche, les rejets de ce site sont systématiquement détectés. Bien que située avant la zone de mélange homogène des rejets, la SMP prélève bien dans la « veine des rejets ». Avant ce déplacement fin 2018, un problème de représentativité des prélèvements existait, a priori depuis la modification de l'ouvrage de rejet en 1996, quand le CNPE est passé d'un rejet effectué en berge gauche à un rejet par une clarinette au milieu de Loire.

Dans le cas de Chinon, pour des débits de la Loire inférieurs à 100 m³/s, les prélèvements sont bien effectués dans la « veine des rejets » même si la distance de mélange homogène n'est pas atteinte. En revanche, pour les débits compris entre 100 et 500 m³/s, le positionnement de la SMP induit des problèmes de détection et/ou de représentativité des échantillons. Pour des débits supérieurs à 500 m³/s, les mesures sont trop variables et insuffisamment nombreuses pour permettre de conclure. Il est à noter que, à l'image du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux, ces problèmes datent sans doute de la modification de l'ouvrage de rejet qui est passé d'un rejet en berge gauche à un rejet par clarinette immergée en Loire, en 1999. Il convient d'indiquer qu'à la demande de l'ASN, EDF étudie actuellement les solutions techniques à mettre en œuvre pour permettre aux prélèvements effectués à la SMP aval de Chinon de systématiquement détecter et être représentatifs des rejets du CNPE dans toutes les conditions de débits.

Enfin, les rejets du site de Civaux sont toujours détectés quel que soit le débit de la Vienne et la SMP prélève bien dans la zone de mélange homogène des rejets du CNPE.

Ainsi, cette étude a montré que le positionnement des SMP situées en aval des CNPE de la Loire et de la Vienne, à l'exception du site de Chinon, permettent de détecter les rejets liquides du CNPE surveillé de façon satisfaisante et que les concentrations mesurées à ces SMP étaient au moins égales à l'activité moyenne en tritium ajoutée par ces rejets, permettant de vérifier le respect des valeurs limites prescrites par la réglementation en présence de rejets radioactifs du CNPE surveillé.

Elle a en outre permis de mieux comprendre et caractériser la dispersion des rejets liquides en aval de ces CNPE et a démontré la pertinence et l'utilité de la modélisation de la dispersion des rejets pour confirmer la représentativité et interpréter les mesures de la surveillance. Enfin, cette étude a apporté un éclairage complémentaire aux études de dilution en investiguant sur une période pluriannuelle un plus grand nombre de régimes hydrauliques et conduit à être vigilant à l'impact que peuvent avoir les changements d'écoulement du cours d'eau et/ou de la configuration de rejet, sur la représentativité des SMP, notamment pour les CNPE pouvant opérer les rejets par plusieurs conduites de rejet.

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE	10
2. LES CNPE DU BASSIN VERSANT ET LEURS REJETS.....	11
2.1 PRESENTATION DES SITES.....	12
— CNPE de BELLEVILLE-SUR-LOIRE	12
— CNPE de DAMPIERRE EN BURLY.....	14
— CNPE de SAINT-LAURENT-DES-EAUX.....	16
— CNPE de CHINON	18
— CNPE DE CIVAUX.....	20
2.2 LA REGLEMENTATION DES REJETS	22
2.3 LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT AUX SMP DES CNPE.....	24
3. METHODOLOGIE.....	26
3.1 MESURES DE TRITIUM DANS L'EAU	26
3.2 MODELISATION A UNE DIMENSION (1D) SUR LA LOIRE ET LA VIENNE.....	27
3.3 MODELISATION 2D DES ZONES DE MELANGE A L'AVAL DES CNPE.....	28
3.4 ANALYSE DE LA REPRESENTATIVITE DES SMP AVAL.....	29
— Comparaison modèle 1D-mesures.....	30
— Détection des rejets du CNPE surveillé	30
— Représentativité des mesures vis-à-vis des rejets du CNPE surveillé	32
— Représentativité des échantillons vis-à-vis des rejets des CNPE en amont du CNPE surveillé	33
— Modélisation du profil latéral des activités volumiques	33
4. ANALYSE PAR SITE	35
4.1 BELLEVILLE	35
— Comparaison modèle-mesures	35
— Détection des rejets du CNPE de Belleville	35
— Représentativité des mesures vis-à-vis des rejets du CNPE de Belleville.....	37
— Modélisation du profil latéral des activités volumiques	37
— Synthèse.....	39
4.2 DAMPIERRE-EN-BURLY	39
— Comparaison modèle-mesures	39
— Détection des rejets du CNPE de Dampierre.....	41
— Représentativité des mesures vis à vis des rejets du CNPE de Dampierre.....	43
— Détection et représentativité des mesures vis à vis des rejets des CNPE en amont du CNPE de Dampierre	43
— Modélisation du profil latéral des activités volumiques	45
— Synthèse.....	46

43 SAINT-LAURENT-DES-EAUX	46
— Comparaison modèle-mesures	46
— Détection des rejets du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	47
— Représentativité des mesures vis à vis des rejets du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	49
— Détection et représentativité des mesures vis-à-vis des rejets des CNPE en amont du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	50
— Modélisation du profil latéral des activités volumiques	52
— Synthèse.....	53
44 CHINON	54
— Comparaison modèle-mesures	54
— Détection des rejets du CNPE de Chinon.....	54
— Représentativité des mesures vis à vis des rejets du CNPE de Chinon	55
— Détection et représentativité des mesures vis à vis des rejets des CNPE en amont du CNPE de Chinon	56
— Modélisation du profil latéral des activités volumiques	57
— Synthèse.....	59
45 CIVAUX.....	59
— Comparaison modèle-mesures	59
— Détection des rejets du CNPE de Civaux	59
— Représentativité des mesures vis à vis des rejets du CNPE de Civaux	61
— Modélisation du profil latéral des activités volumiques	61
— Synthèse.....	62
 5. SYNTHESE POUR L'ENSEMBLE DES CNPE.....	 63
6. CONCLUSIONS	67
7. REFERENCES.....	69
8. ANNEXES	70
8.1 MODELISATION 1D : PLATEFORME SYMBIOSE ET CODE CASTEUR.....	70
— Modélisation du domaine de calcul	70
— Modélisation de l'hydraulique.....	71
— Modélisation des concentrations	71
— Synthèse des paramètres de calcul	71
8.2 PREPARATION DU JEU DE DONNEES POUR LA MODELISATION 1D	72
— Modélisation du réseau fluvial	72
— Calcul hydraulique.....	73
— Rejets de tritium des CNPE	78
8.3 COMPARAISONS MODELE 1D-MESURES.....	79
— Belleville-sur-Loire.....	79
— Dampierre-en-Burly.....	82
— Saint-Laurent-des-Eaux.....	85
— Chinon	88
— Civaux.....	91

84 CALAGE DU CODE CASTEAUR2D	94
— CNPE de Belleville sur Loire	94
— CNPE de Dampierre en Burly	106
— CNPE de Saint Laurent des Eaux	113
— CNPE de Civaux.....	121
 9. GLOSSAIRE	 137

CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

Une activité volumique de tritium nettement plus élevée que celles habituellement observées dans le cadre de la surveillance, a été mesurée par l'Association pour le Contrôle de la radioactivité dans l'Ouest (ACRO), dans un prélèvement d'eau effectué dans la Loire au pont Cessart à Saumur en janvier 2019. Afin d'évaluer la reproductibilité de cette mesure, l'IRSN a réalisé, entre 2020 et 2021, une campagne de prélèvements et de mesures spécifiques associée à des modélisations de la dispersion des rejets liquides des cinq Centres Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE) du bassin de la Loire [1].

Au cours de cette étude, les activités volumiques de tritium ont été modélisées au fil du réseau hydrographique constitué de la Loire et de la Vienne, depuis les CNPE de Belleville sur Loire et Civaux sur la Vienne jusqu'à Saumur, à partir des rejets déclarés par EDF pour les cinq CNPE et des données de débit de la Loire et de ses principaux affluents. Ces modélisations ont été comparées aux activités volumiques mesurées par l'IRSN pendant cette campagne au pont Cessart à Saumur et à celles de la surveillance de l'environnement réalisées par EDF aux stations multi-paramètres (SMP) situées en aval des CNPE.

Cette étude [1] a révélé la difficulté pour la SMP aval du CNPE de Chinon à détecter les rejets de celui-ci lorsque le débit de la Loire est supérieur à 100 m³/s. Elle a également montré l'intérêt et la pertinence de croiser les mesures d'activités volumiques avec celles issue de la modélisation de la dispersion des rejets en rivière pour analyser et interpréter les résultats de la surveillance de ces rejets.

Dans ce contexte, l'objectif de cette nouvelle étude est de vérifier que les SMP situées en aval des CNPE de la Loire et de la Vienne sont correctement positionnées pour fournir des échantillons dont les activités volumiques de tritium mesurées sont représentatives de l'activité moyenne en tritium ajoutée par les rejets du CNPE surveillé.

Pour y répondre, cette étude a comparé les activités volumiques de tritium mesurées par EDF dans les échantillons prélevés entre janvier 2017 et avril 2021 au moyen des SMP, avec les activités volumiques estimées par la modélisation de la dispersion du tritium rejeté par ces CNPE à partir des chroniques de rejet déclarés par EDF à l'ASN et des conditions de débit des cours d'eau sur cette période.

Le rapport est organisé en quatre parties. La première décrit les sites nucléaires, leurs ouvrages de rejets ainsi que les SMP aval et les conditions réglementaires dans lesquelles s'effectuent les rejets liquides des CNPE du bassin de la Loire et de la Vienne. La seconde partie présente la méthodologie de l'étude, la troisième détaille les résultats obtenus pour chacun des cinq sites et la dernière partie présente une synthèse de l'analyse réalisée.

LES CNPE DU BASSIN VERSANT ET LEURS REJETS

Cinq CNPE sont implantés dans le bassin versant de la Loire et de la Vienne (Figure 1) :

- sur la Loire, d'amont en aval :
 - 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)
 - Chinon (département d'Indre-et-Loire, avec 4 tranches de 900 MWe).
- Civaux sur la Vienne (département de la Vienne, avec 2 tranches de 1450 MWe).



Figure 1 : Emplacement des cinq CNPE du bassin versant de la Loire et de la Vienne

Les CNPE du bassin de la Loire rejettent des effluents liquides au moyen de conduites de rejet multipores, appelées « clarinettes », qui servent à la fois aux rejets des eaux de refroidissement et aux rejets contrôlés des réservoirs d'effluents radioactifs. Il s'agit de conduites installées en travers de l'écoulement du cours d'eau et munies de plusieurs buses pour améliorer le mélange des rejets. Le nombre de telles conduites, leur longueur ainsi que le nombre de buses varient d'un CNPE à un autre.

La surveillance des rejets liquides dans la Loire et la Vienne est réalisée par chaque CNPE au niveau d'une SMP située en aval de l'ouvrage de rejet. La SMP aval est normalement située dans une zone permettant de mesurer les activités volumiques de la rivière de façon à s'assurer du bon déroulement des opérations de rejet et que l'impact au cours d'eau respecte le cadre réglementaire.

2.1 PRESENTATION DES SITES

— CNPE de BELLEVILLE-SUR-LOIRE

Le CNPE de Belleville-sur-Loire est situé sur la commune de Léré, sur la rive gauche de la Loire, à 70 km de Bourges, au nord-est du département du Cher.

Il compte 2 réacteurs à eau pressurisée d'une puissance électrique unitaire de 1300 MWe, mis en service en 1987 et 1988 (INB 127 et 128), refroidis grâce à des tours aéroréfrigérantes à tirage naturel.



Figure 2 : CNPE de Belleville-sur-Loire

Ouvrage de rejet des effluents liquides en Loire

Les eaux de refroidissement et les effluents liquides du CNPE sont évacués en Loire par un ouvrage de rejet positionné en rive gauche. L'ouvrage de rejet, d'une longueur de 94 m, est constitué de deux clarinettes, comportant chacune 14 buses de rejet, soit 28 au total.

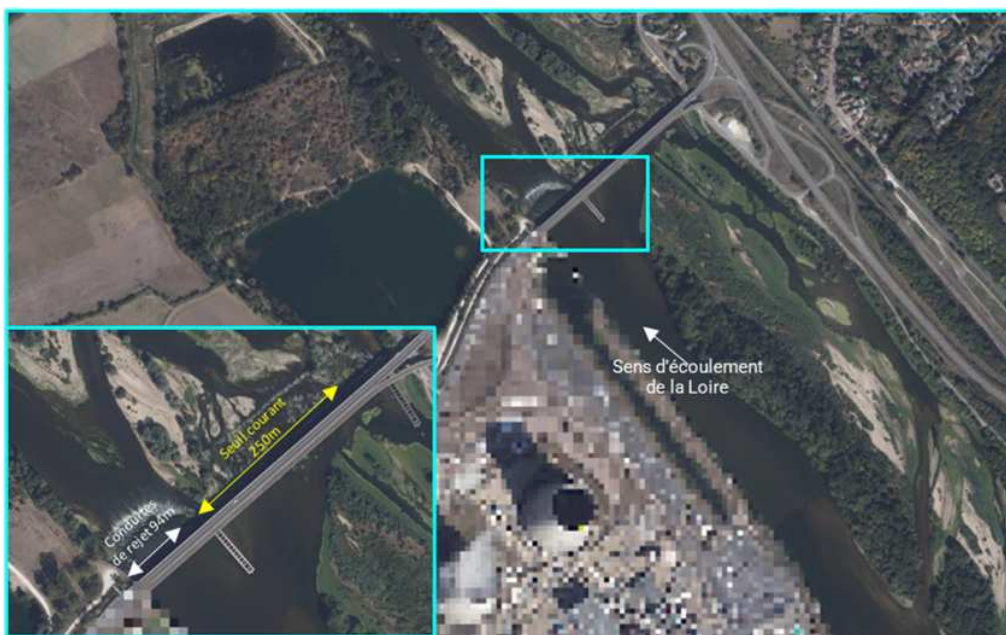


Figure 3 : Visualisation satellite de l'ouvrage de rejet du CNPE de Belleville-sur-Loire

Station de surveillance multi-paramètres aval

La SMP aval se trouve à 12,5 km en aval du CNPE, sur la rive gauche de la Loire, 100 m en amont de la jonction avec l'écluse des Mantelots et ses prélèvements sont réalisés en bordure de la rive gauche.



Figure 4 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Belleville sur Loire

Dans cette zone (Figure 5), une digue (la chevette des Mantelots) est disposée pour orienter l'écoulement principal de la Loire vers la rive gauche de façon à permettre la navigation des bateaux transitant par l'écluse.



Figure 5 : SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire au sein de l'écluse des Mantelots

CNPE de DAMPIERRE EN BURLY

Le CNPE de de Dampierre-en-Burly est située dans la commune de Dampierre-en-Burly, à 55 km d'Orléans, dans le département du Loiret.

Il comprend 4 réacteurs à eau pressurisée d'une puissance unitaire de 900 MWe, mis en service en 1980 pour les unités de production n°1 et 2 (INB 84) et 1981 pour les unités de production n°3 et 4 (INB 85) refroidis grâce à des tours aéroréfrigérantes à tirage naturel.



Figure 6 : CNPE de Dampierre en Burly

Ouvrage de rejet des effluents liquides en Loire

Le canal de rejet est parallèle au canal d'amenée, situés tous deux au sud-est du CNPE. Les effluents sont déversés dans un ouvrage de dilution avant de rejoindre l'ouvrage de rejet en Loire.



Figure 7 : Implantation des ouvrages liés au prélèvement d'eau et aux rejets du CNPE de Dampierre-en-Burly

L'ouvrage de rejet est composé de deux clarinettes comprenant chacune 10 buses noyées dans la Loire, soit un total de 20 buses réparties sur une longueur de 30 mètres en rive droite de la Loire (Figure 8).



Figure 8 : Visualisation satellite de l'ouvrage de rejet en Loire du CNPE de Dampierre-en-Burly

Station de surveillance multi-paramètres aval

La SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly se situe au niveau du lieu-dit « le port », en rive droite de la Loire, à Ouzouer-sur-Loire, à environ 5 km en aval de l'ouvrage de rejet (Figure 9 et Figure 10).



Figure 9 : Situation géographique de la SMP aval CNPE de Dampierre-en-Burly



Figure 10 : SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly

CNPE de SAINT-LAURENT-DES-EAUX

Le CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux est situé en région Centre-Val de Loire, dans le département du Loir-et-Cher (41), à 30 km de Blois, sur le territoire de la commune de Saint-Laurent-Nouan. Il est implanté en bordure de la rive gauche de la Loire.



Figure 11 : CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

Le site comporte trois INB :

- L'INB n° 46 : constituée de deux réacteurs nucléaires de la filière Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG), d'une puissance électrique unitaire de 500 MWe, dénommés Saint-Laurent SLA1 et SLA2, couplés au réseau respectivement en 1969 et 1971, arrêtés définitivement en avril 1990 et mai 1992 et actuellement en phase de démantèlement.
- L'INB n° 74 : constituée de deux silos d'entreposage des chemises de graphite irradiées issues de l'exploitation des réacteurs de SLA1 et SLA2 en phase de démantèlement.
- L'INB n° 100 : appelée CNPE de Saint-Laurent B, constituée de deux réacteurs nucléaires jumelés à eau sous pression, d'une puissance électrique unitaire de 900 MWe et dénommés SLB1 et SLB2, mis en service successivement en janvier et juin 1981 et refroidis grâce à des tours aéroréfrigérantes à tirage naturel.

Ouvrage de rejet des effluents liquides en Loire

Lors de la mise en service des premiers réacteurs du site, les rejets d'effluents liquides se faisaient en berge gauche.

En 1996, l'ouvrage de rejet a été remplacé par une conduite multipores dans le lit de la Loire. Celle-ci mesure 160 m de long de la berge gauche à son extrémité et elle est équipée d'une série de 7 buses espacées de 5 m, soit une longueur de rejet de 30 m située au milieu de la Loire (Figure 12).



Figure 12 : Visualisation satellite de l'ouvrage de rejet du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

Station de surveillance multi-paramètres aval

La SMP aval du CNPE est située en rive gauche de la Loire, à environ 5,5 km en aval de l'ouvrage de rejet, en amont du pont de Muides-sur-Loire.

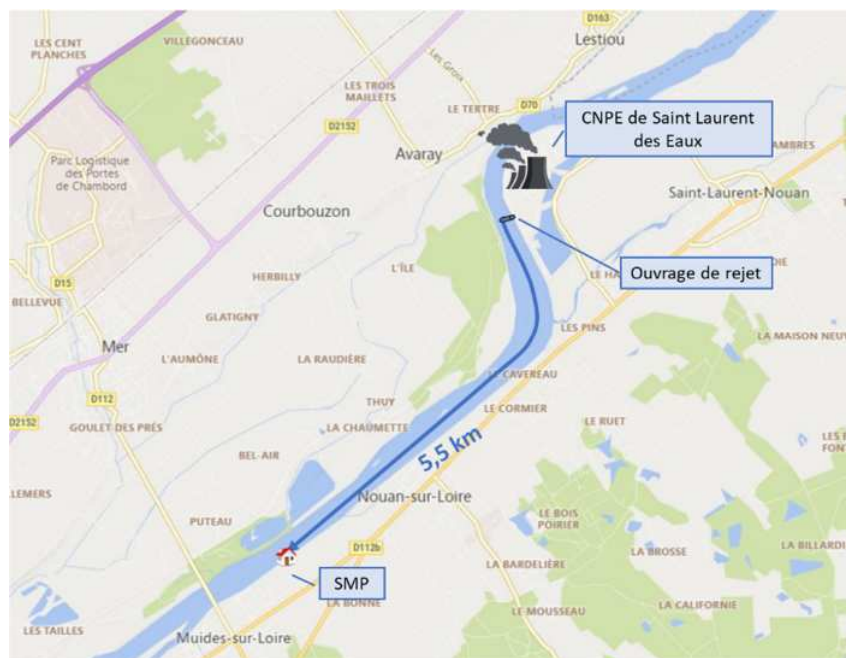


Figure 13 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

Le prélèvement, réalisé auparavant à 5 mètres de la berge gauche a été déplacé en 2018 d'environ 70 m vers le centre de la Loire, conformément à la prescription de l'article 4 de la Décision ASN n 2015-DC-0499.

Ce nouveau positionnement prend en compte l'influence de la modification de l'ouvrage de rejet survenus en 1996 et la connaissance de la dilution des rejets liquides de Saint-Laurent B (1 et 2) acquise lors des campagnes de dilution réalisées par EDF en 2011 et 2014 [2] (Figure 14).



Figure 14 : SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

— CNPE de CHINON

Le CNPE de Chinon est situé en région Centre-Val de Loire dans le département d'Indre-et-Loire (37) à 55 km de la ville de Tours. Il se trouve sur le territoire de la commune d'Avoine, en rive gauche de la Loire. Il est implanté immédiatement en aval de la confluence de l'Indre et de la Loire et à 7 km en amont de celle de la Vienne et de la Loire. C'est le dernier CNPE situé sur la Loire.

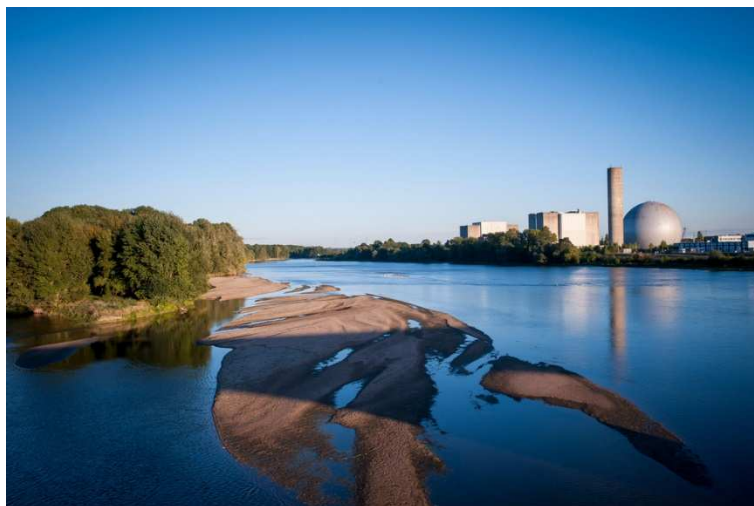


Figure 15 : CNPE de Chinon

Le site comporte sept Installations Nucléaires de Base (INB) :

- Le CNPE de Chinon B : composé de quatre réacteurs nucléaires à eau pressurisée, d'une puissance électrique unitaire de 900 MWe, Chinon B1 et Chinon B2 (INB n° 107), mis en service en 1984 et Chinon B3 et Chinon B4 (INB n° 132) mis en service en mars 1987 et avril 1988, refroidis grâce à des tours aéroréfrigérantes à tirage naturel.
- Le Magasin Inter-Régional (MIR) : installation d'entreposage de combustibles neufs pour les CNPE et qui constitue l'INB n°99.
- L'Atelier des Matériaux Irradiés (AMI) : constitue l'INB n° 94, mis en service en 1963, et en cours de démantèlement.
- Trois réacteurs de la filière Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG) (Chinon A) : à l'arrêt et en cours ou en projet de démantèlement.

Ouvrage de rejet des effluents liquides en Loire

Jusqu'en 1999, les rejets du CNPE de Chinon étaient effectués en berge gauche de la Loire. Ce dispositif a été modifié en 1999 afin d'améliorer la dilution des rejets liquides au sein du cours d'eau via une conduite de rejet multipores commune aux 4 tranches et située dans la veine principale de l'écoulement du fleuve. D'une longueur de 130 m environ, cette conduite est munie de 11 buses formant la zone de rejet sur une longueur de 65 m (Figure 16). Pour des débits compris entre 1800 et 2000 m³/s, les rejets liquides sont simultanément réalisés en berge par l'ancien dispositif et par la clarinette. Les rejets d'effluents radioactifs sont interdits pour des débits supérieurs à 2000 m³/s.



Figure 16 : Visualisation satellitaire de l'ouvrage de rejet du CNPE de Chinon

Station de surveillance multi-paramètres aval

La SMP aval du CNPE est positionnée en rive gauche de la Loire, à 6,5 km en aval de l'ouvrage de rejet et à environ 1 km en amont de la confluence avec la Vienne.

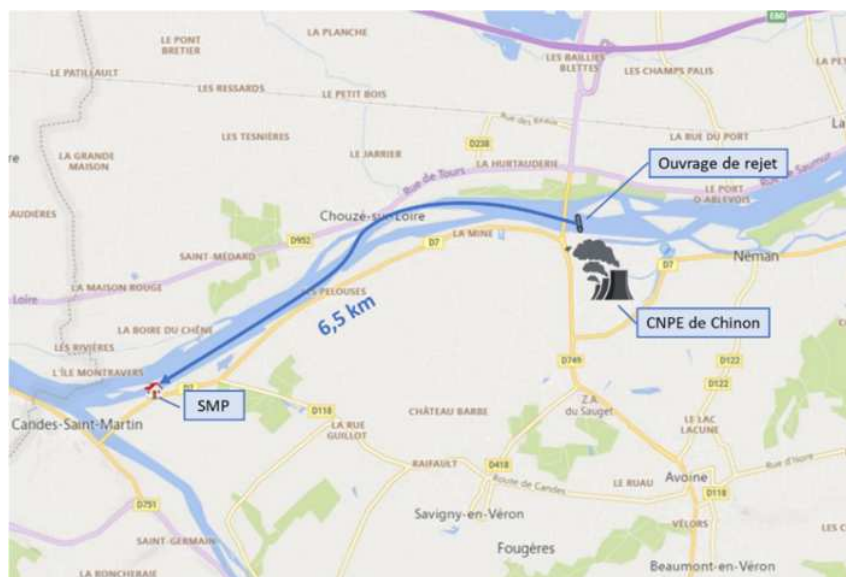


Figure 17 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Chinon

Sur cette portion, la Loire se partage en deux chenaux séparés par une île végétalisée (Figure 18). Le prélèvement est réalisé à environ 5 mètres de la berge gauche du chenal gauche.



Figure 18 : SMP aval du CNPE de Chinon

CNPE DE CIVAUX

Le CNPE de Civaux est situé sur la commune de Civaux, dans le département de la Vienne à 30 km de Poitiers.

Il est composé de deux réacteurs nucléaires à eau pressurisée (INB n° 158 et 159) d'une puissance unitaire électrique de 1495 MW, refroidis par des tours aéroréfrigérantes et couplés au réseau en 1997 et 1999.



Figure 19 : CNPE de Civaux

Ouvrage de rejet des effluents liquides dans la Vienne

L'ouvrage de rejet du CNPE est implanté au niveau d'un barrage seuil permettant d'obstruer tout ou partie de la Vienne dans le but de créer une retenue d'eau. Une partie du barrage est effaçable pour gérer les variations de débits.

Cet ouvrage est composé de deux conduites de rejets (Figure 20) :

- une conduite courte située du côté de la rive gauche de la rivière et disposant de 5 buses de rejet situées devant la partie effaçable du barrage-seuil,
- une conduite longue d'une longueur d'environ 75 mètres située sur toute la largeur de la Vienne et disposant de 5 buses de rejet réparties sur sa longueur afin de favoriser la dilution des rejets dans la Vienne.

Dans la grande majorité des cas, la conduite longue est utilisée pour effectuer les rejets.

Figure 20 : Visualisation satellitaire de l'ouvrage de rejet du CNPE de Civaux



Station de surveillance multi-paramètres aval

La SMP aval du CNPE dédiée au suivi des rejets d'effluents liquides radioactifs (dénommée par EDF, SM4 - hydrocollecteur aval) est située à environ 6 km en aval de l'ouvrage de rejet, en rive gauche de la Vienne, à proximité du pont de Saint-Martin-la-Rivière, commune de Valdivienne, lieu-dit Chambon Bas (Figure 21).



Figure 21 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Civaux



Figure 22 : Visualisation satellitaire du positionnement de la SMP aval du CNPE de Civaux

2.2 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 et de la Vienne sont encadrés, pour chaque site, par une décision homologuée par un arrêté fixant les limites de rejet des effluents dans l'environnement (dite décision « limites »), et une décision dite « modalités », fixant les modalités de prélèvement et de consommation d'eau, de rejet d'effluents 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	2024-DC-0779	Arrêté du 25 avril 2024	2024-DC-0778
Dampierre-en-Burly	2022-DC-0732	Arrêté du 16/08/2022	2022-DC-0731
Saint-Laurent-des-Eaux	2015-DC-0498	Arrêté du 19/03/2015	2015-DC-0499
Chinon	2022-DC-0734	26 juillet 2022	2022-DC-0733
Civaux	2011-DC-0233	Arrêté du 02/08/2011	2021-DC-0717

La surveillance des rejets liquides inclut les 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 l'activité volumique des différents radionucléides pour s'assurer qu'elle respecte les limites réglementaires, ce qui peut, si ce n'est le cas, nécessiter un traitement préalable avant rejet. Un contrôle gamma global par deux chaînes

indépendantes est également réalisé « en ligne », de manière continue, 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 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 des circuits de refroidissement afin d'assurer une dilution d'un facteur minimal de 500 pour les quatre sites nucléaires autres que Dampierre et 300 pour Dampierre.

Des conditions sur les débits du cours d'eau récepteur doivent être respectées pour que chaque installation puisse procéder aux rejets des effluents liquides radioactifs (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs de débits du cours d'eau minimales et maximales permettant un rejet pour les CNPE de la Loire et la Vienne

CNPE	Débit minimal (m³/s)	Débit maximal (m³/s)	Dispositions complémentaires
Belleville-sur-Loire	30	1500	Lorsque le débit de la Loire est compris entre 30 et 50 m³/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 m³/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 m³/s, les rejets ne peuvent avoir lieu qu'après information préalable de l'ASN
Chinon	54	2000	Lorsque le débit est compris entre 1800 et 2000 m³/s, les rejets sont répartis entre la conduite multipores et l'ouvrage en berge
Civaux	20 ¹	400	Lorsque le débit de la Vienne est compris entre 20 et 27 m³/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 annuelles d'activités rejetées et des débits d'activité des rejets limités en fonction du débit du cours d'eau pour ne pas dépasser, en moyenne journalière, une activité volumique de bon mélange maximale. A titre d'exemple, les limites pour le tritium sont fournies dans le Tableau 3.

¹ Exceptionnellement, dans le cas d'un étiage prolongé et lorsque la possibilité d'utilisation des réservoirs de santé (réservoirs vides pouvant être utilisés en secours des réservoirs (T) après accord préalable de l'ASN) ne peut plus être employée, le rejet d'un réservoir T (réservoir de traitement appelé réglementairement réservoir T dédié à l'entreposage des effluents) 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).

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 maximal (Bq/s)
Belleville-sur-Loire	60 000	
Dampierre-en-Burly	100 000	80 x Débit Loire (en L/s)
Saint-Laurent-des-Eaux	45 000	
Chinon	80 000 ²	
Civaux	80 000 à 90 000 ³	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

2.3 LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT AUX SMP DES CNPE

Pour chaque CNPE, la décision ASN prescrit la réalisation de prélèvements d'eau de rivière aux SMP amont et aval du site (Figure 23).

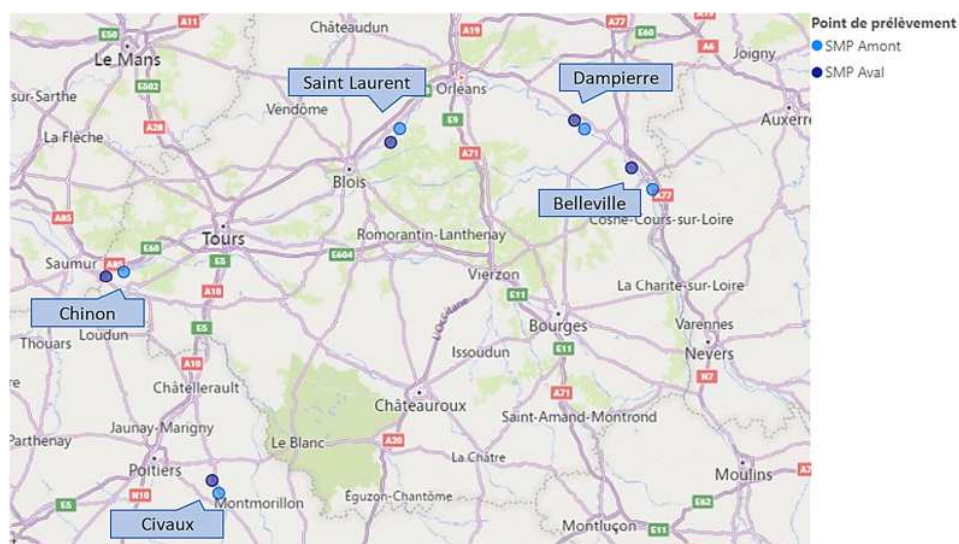


Figure 23 : Positionnement des stations multi-paramètres (SMP) des CNPE de la Loire et de la Vienne

² 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 de rejet de tritium respectivement de 3 GBq/an et 0,93 GBq/an.

³ Selon le type et la gestion du combustible retenue.

Au niveau de chaque SMP, des prélèvements horaires sont réalisés par des hydrocollecteurs. Un aliquote du prélèvement composite, constitué à partir de ces 24 prélèvements, fait l'objet de l'analyse réglementaire journalière de tritium.

En période de rejet, le prélèvement horaire de la SMP aval correspondant au mi-rejet fait l'objet d'analyses de tritium, bêta global et ^{40}K par EDF pour lesquels les activités volumiques ne doivent pas excéder les limites suivantes :

Tableau 4 : Niveaux d'activité volumique maximaux prescrits dans le milieu récepteur

Type de 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)
Site de bord de rivière	280	2	140 ⁽¹⁾ / 100 ⁽²⁾	-

⁽¹⁾ en présence de rejet radioactif / ⁽²⁾ en l'absence de rejet radioactif

Des analyses complémentaires sont exigées en cas de dépassement de ces niveaux d'activité volumique maximum prescrits. Le Tableau 5 présente l'ensemble des analyses réglementaires prescrites par l'ASN et réalisées par EDF en routine et en cas de dépassement des niveaux pour les CNPE de la Loire et de la Vienne.

Ces mesures sont disponibles sur le site public du RNM, Réseau National de Mesures de la radioactivité de l'environnement (www.mesure-radioactivite.fr).

Tableau 5 : Prélèvements et mesures relatives à la surveillance des eaux de surface en aval des CNPE du bassin versant de la Loire et de la Vienne

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

METHODOLOGIE

La méthode utilisée pour évaluer la représentativité des SMP aval s'est d'abord appuyée sur l'analyse par modélisation à une dimension (1D) des deux indicateurs suivants :

1. Pour repérer les éventuelles défaillances dans la détection par la SMP des rejets du CNPE, on s'est intéressé aux échantillons, prélevés par la SMP et pour lesquels l'activité volumique de tritium était trop faible pour être mesurée alors que le modèle prévoyait une activité volumique de tritium mesurable ($> 5 \text{ Bq/L}$) ;
2. Pour vérifier que les échantillons fournis par la SMP sont bien prélevés dans la partie du cours d'eau où circule l'essentiel du tritium rejeté par le CNPE, appelée « veine des rejets », on s'est intéressé au rapport entre les activités volumiques de tritium mesurées et celles attendues par modélisation.

Pour cela, les chroniques d'activité volumique de tritium mesurées aux SMP aval par la surveillance EDF entre janvier 2017 et avril 2021 sont comparées à des modélisations 1D du transfert du tritium rejeté par ces CNPE à partir des chroniques de rejet et des conditions de débit des cours d'eau sur cette même période, réalisées avec la plateforme de modélisation SYMBIOSE de l'IRSN. Cette plateforme permet de simuler la dispersion sur les linéaires de la Loire et de la Vienne des rejets de tritium de tous ses CNPE.

Cette analyse est complétée par la caractérisation de la dispersion transversale des rejets de tritium entre les ouvrages de rejet et les SMP aval de chaque CNPE à l'aide de modélisations à deux dimensions (2D) réalisées avec le code CASTEAUR2D de l'IRSN préalablement calibré sur les données EDF de traçages liquides⁴ disponibles sur chaque site.

Ce paragraphe présente ainsi successivement :

1. les mesures d'activités volumiques aux SMP aval exploitées,
2. la modélisation 1D mise en œuvre pour évaluer les variations dans l'espace et dans le temps des activités volumiques moyennes en tritium aux sections du cours d'eau,
3. la méthode de comparaison des mesures et des prévisions des modèles,
4. la modélisation 2D mise en œuvre pour évaluer la répartition transversale (sur la largeur du cours d'eau) des activités volumiques en tritium au droit des SMP aval des CNPE pour différents débits du cours d'eau.

3.1 MESURES DE TRITIUM DANS L'EAU

Cette étude exploite les mesures d'activité volumique en tritium dans l'eau effectuées sur des échantillons composites journaliers constitués à partir des 24 prélèvements horaires effectués par les hydrocollecteurs des SMP aval des sites de la Loire et de la Vienne.

Sur chaque échantillon composite journalier, une aliquote est prélevée, puis filtrée à $0,45 \mu\text{m}$. Une quantité équivalente de liquide scintillant est ensuite ajoutée puis la solution est homogénéisée et mesurée par scintillation liquide.

La Figure 24 ci-dessous présente un exemple de chronique de mesures « quotidiennes » à une SMP aval issues du RNM. Les résultats de mesures significatifs (supérieurs au seuil de décision) sont représentés par des points rouges pleins assortis de l'incertitude de mesure, et les points rouges évidés représentent les mesures inférieures au seuil de décision (SD)⁵.

⁴ Etudes qui consistent à suivre la propagation en rivière de rejets contrôlés de traceur chimique ou radiologique à l'aval d'un ouvrage de rejet afin d'en apprécier les caractéristiques de dispersion dans le milieu.

⁵ 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.

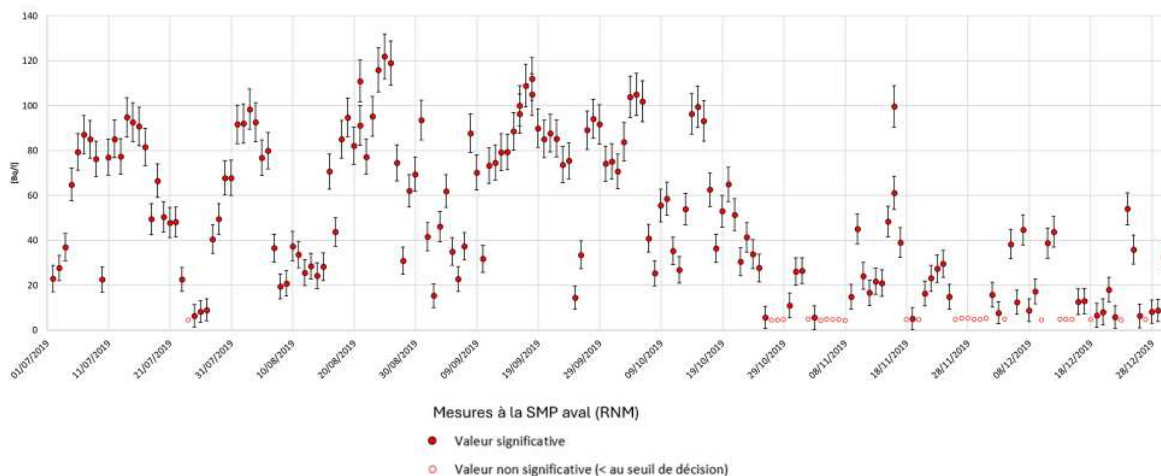


Figure 24 : Exemple de chronique des mesures d'activités volumiques de ^3H dans les mesures quotidiennes à une SMP aval (site de Dampierre, 2nd semestre 2019) issue du RNM

3.2 MODELISATION A UNE DIMENSION (1D) SUR LA LOIRE ET LA VIENNE

La dispersion à l'échelle du réseau hydrographique de la Loire et la Vienne du tritium rejeté par les cinq CNPE entre janvier 2017 et avril 2021 est simulée par modélisation 1D afin d'estimer les activités volumiques moyennes du tritium aux sections du cours d'eau et en particulier au niveau des SMP aval de ces CNPE. L'objectif est double :

- comparer les niveaux prédits et mesurés aux SMP aval et évaluer les contributions de chaque CNPE à l'activité attendue,
- apprécier la représentativité des échantillons prélevés par la SMP située en aval des CNPE.

Cette modélisation 1D est effectuée avec le code CASTEAUR, intégré dans la plateforme SYMBIOSE de simulation du transfert de radionucléides dans les écosystèmes et d'évaluation de leur impact sur l'homme et le biota non humain. Il est décrit dans l'annexe 8.1.

Les simulations sont effectuées à la suite de la préparation du jeu de données nécessaire à la modélisation, qui se déroule en trois étapes :

- constituer un modèle du réseau fluvial de la Loire et la Vienne depuis les amonts des CNPE de Belleville et de Civaux jusqu'en aval de Saumur,
- collecter et prétraiter les données de débit de la Loire et la Vienne pour modéliser l'hydraulique et évaluer les débits et les vitesses de transfert sur l'ensemble du réseau et sur la période étudiée,
- compiler et prétraiter les données de rejet de tritium des 5 CNPE du bassin versant de la Loire et de la Vienne pour modéliser le transfert du tritium sur l'ensemble du réseau et sur la période étudiée.

Ces étapes de constitution du jeu de données sont détaillées dans l'annexe 8.2.

Les résultats produits par le modèle sont les évolutions temporelles au pas de temps de 15 minutes des activités volumiques moyennes en tritium au niveau de chaque maille de calcul de la Loire et de la Vienne, d'une longueur de 250 m, et en particulier au niveau des SMP aval. Lorsqu'il y a plusieurs CNPE en amont d'un bief, le calcul permet de distinguer les contributions spécifiques de chaque CNPE aux activités volumiques estimées. La Figure 25, ci-dessous, présente un exemple des résultats du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly, avec :

- au pas de temps de 15 minutes :
 - l'activité volumique moyenne en tritium attendue au niveau de la SMP aval (courbe rouge) ;
 - les contributions du CNPE suivi (courbe verte) et des CNPE situés en amont (courbe orange) ;
- au pas de temps journalier, l'activité volumique quotidienne calculée en moyennant sur 24 h les activités au pas de temps de 15 minutes (carrés bleus). Ces données seront comparées aux mesures journalières de la surveillance réalisée par EDF aux SMP aval.

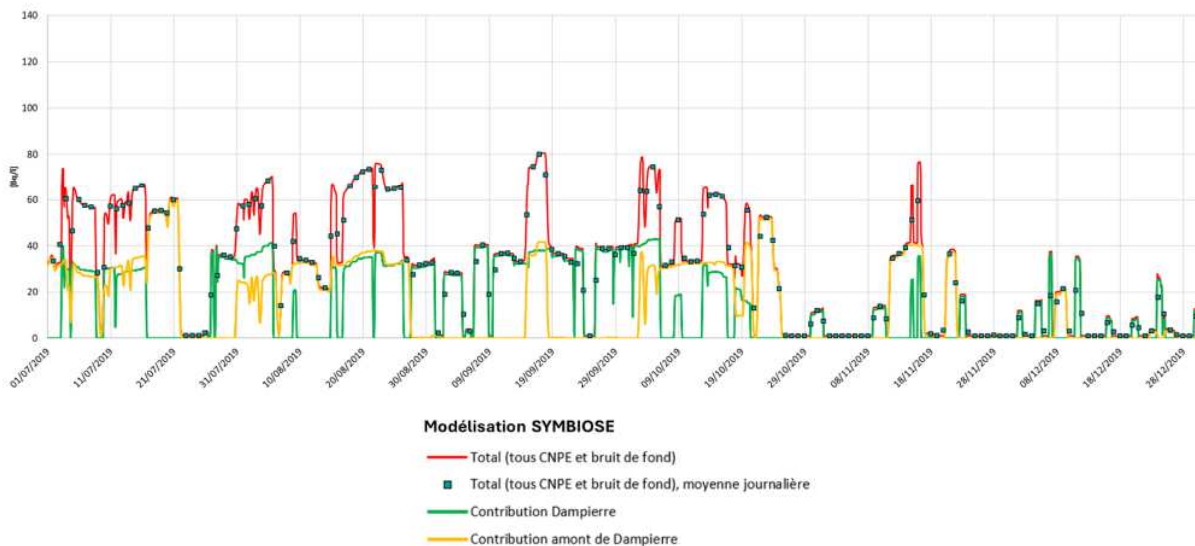


Figure 25 : Exemple de la modélisation 1D de l'activité volumique du tritium à la SMP aval du CNPE de Dampierre au 2nd semestre 2019

Cet exemple permet d'apprécier que l'activité volumique totale attendue (courbe rouge) est tantôt due aux rejets d'un seul CNPE, par exemple Dampierre-en-Burly (courbe verte) entre fin août et mi-septembre 2019 ou Belleville-sur-Loire (courbe orange) entre mi et fin juillet 2019, tantôt aux rejets des 2 CNPE. Sur ce second semestre 2019, les rejets de ces 2 CNPE se font sur des échelles temporelles assez similaires de l'ordre de quelques jours et induisent des activités volumiques du même ordre, bien que des dynamiques infra-journalières sont perceptibles avec des rejets plus courts, par exemple du CNPE de Dampierre-en-Burly vers la mi-novembre 2019. Dans ces situations, les valeurs moyennes quotidiennes prédites par le modèle peuvent différer des minima et maxima atteints de façon transitoire lors d'une journée (cf. position des carrés bleus vis-à-vis de la courbe rouge vers la mi-novembre).

3.3 MODELISATION 2D DES ZONES DE MELANGE A L'AVAL DES CNPE

Des modélisations 2D de la dispersion des effluents liquides sont réalisées sur les tronçons de rivière entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval de chaque CNPE. L'objectif est de compléter les analyses 1D par la modélisation, en fonction des conditions de rejet et de débit de la rivière, des profils latéraux d'activité volumique (variation de l'activité volumique sur la largeur du fleuve) au droit des SMP aval et des activités volumiques aux points de prélèvement.

Ces modélisations sont réalisées avec le code CASTEAUR2D [3] qui est basé sur la solution analytique de l'équation de dispersion 2D obtenue avec les hypothèses d'homogénéité verticale des activités volumiques et de régime permanent des conditions de rejet et de débit de la rivière [4]. Le code est préalablement calibré sur chaque CNPE à partir des traçages liquides réalisés par EDF ou le CEA pour caractériser la dispersion des rejets en aval des ouvrages de rejet en fonction de leurs spécificités et de différentes conditions de débit des cours d'eau (Annexe 8.4).

La mise en œuvre de ce code s'articule en trois étapes qui sont 1) la modélisation du domaine de calcul, 2) de l'hydraulique et 3) des activités volumiques.

- 1) Le domaine de calcul correspond aux portions de rivière comprises entre les ouvrages de rejet de chaque CNPE et leur SMP située en aval. Ces biefs, organisés en série et/ou parallèle (lorsque le cours d'eau se sépare en plusieurs bras) sont orientés de l'amont vers l'aval et sont représentatifs de portions uniformes de la rivière. Ils sont caractérisés par leurs longueurs, largeurs, pentes, rugosités et diffusivités latérales (Figure 26).

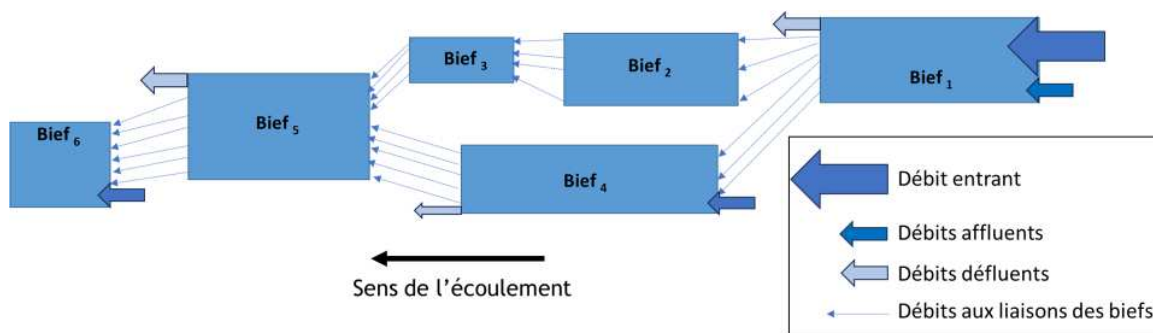


Figure 26 : CASTEAUR2D - Exemple de représentation d'un domaine de calcul

La face amont de chaque bief est décrite par les largeurs des liaisons entrantes qui le relient aux biefs amonts, d'un éventuel affluent droit et d'un éventuel affluent gauche. De même, la face aval est décrite par les largeurs des liaisons sortantes qui le relient aux biefs aval, d'un éventuel défluent droit et d'un éventuel défluent gauche. Les différentes liaisons et leurs largeurs sont détaillées par une matrice de connectivité qui renseigne les connexions entre les biefs.

Chaque bief est caractérisé par une pente et un coefficient de Strickler et une largeur spécifique à chaque condition de débit. Ces dernières ont été déterminées à partir d'images aériennes associées aux conditions de débit à leur date de prise de vue. Les largeurs ainsi obtenues sont extrapolées pour renseigner les conditions de débit qui ne peuvent pas être associées à des images aériennes (application Google Earth utilisée).

- 2) Le débit de chaque bief est donné par la somme de ses apports spécifiques, de ses éventuels affluents et des apports par ses connectivités aux biefs amont. La hauteur d'eau et la vitesse débitante sont ensuite évaluées avec l'équation de Manning-Strickler en fonction du débit, des paramètres hydrographiques en faisant l'hypothèse que les sections sont rectangulaires. Les données d'entrée sont les débits entrants dans le domaine par le premier bief.
- 3) Les activités volumiques de tritium sont modélisées en tous points de chaque bief en sommant les contributions de ses différentes sources, chacune étant définie par sa position dans le bief et son débit de rejet d'activité. Ces sources sont les différentes buses des ouvrages de rejet et les apports par les éventuels affluents et les connectivités avec les biefs amont [3].

Les données d'entrée sont le positionnement et le débit de rejet de chaque buse de l'ouvrage de rejet.

3.4 ANALYSE DE LA REPRESENTATIVITE DES SMP AVAL

L'analyse de la représentativité, au sens large, des échantillons prélevés par les SMP aval est menée en exploitant les mesures et les modélisations lors des étapes successives suivantes :

1. une comparaison qualitative des mesures et des résultats de la modélisation 1D,
2. une analyse des mesures inférieures au seuil de décision (SD) pour identifier d'éventuels problèmes de détection des rejets, connaissant les activités volumiques attendues par la modélisation 1D,
3. une analyse des mesures supérieures au SD pour caractériser la représentativité de celles-ci vis-à-vis des activités volumiques attendues par modélisation 1D,
4. une analyse des profils latéraux des activités volumiques prédits par la modélisation 2D pour mettre en perspective le positionnement du prélèvement dans la section du cours d'eau au droit de la SMP aval.

Pour les CNPE situés en aval d'autres CNPE (cas de Dampierre-en-Burly, Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon), une étape supplémentaire est effectuée avant la modélisation 2D, qui consiste à étudier les défauts de détection et la représentativité des mesures supérieures au SD en l'absence des rejets du CNPE surveillé, lors du passage des panaches des rejets des seuls CNPE amont.

Comparaison modèle 1D-mesures

Cette première étape qualitative consiste à comparer « visuellement » les prévisions du modèle aux mesures. Pour cela sont produits pour chaque SMP aval des graphes semestriels intégrant les éléments suivants :

- les mesures journalières rapportées par EDF au RNM ;
- les résultats « continus » du modèle 1D au pas de temps de 15min, avec d'une part l'activité volumique moyenne en tritium attendue et d'autre part, pour les SMP aval de Dampierre-en-Burly, Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon, deux courbes présentant la contribution du CNPE surveillé et la contribution cumulée des autres CNPE situés en amont ;
- les résultats « quotidiens » du modèle 1D moyennés sur la plage horaire de constitution des échantillons composites journaliers;
- le débit du cours d'eau, Loire ou Vienne, modélisé au niveau de la SMP aval.

Un exemple est reproduit dans la Figure 27 ci-dessous, où la comparaison modèle-mesures se fait par comparaison des points rouges (activités volumiques « quotidiennes » mesurées) et des points bleus (activités volumiques quotidiennes modélisées) l'intégralité des graphes est fournie par site dans l'annexe 8.3.

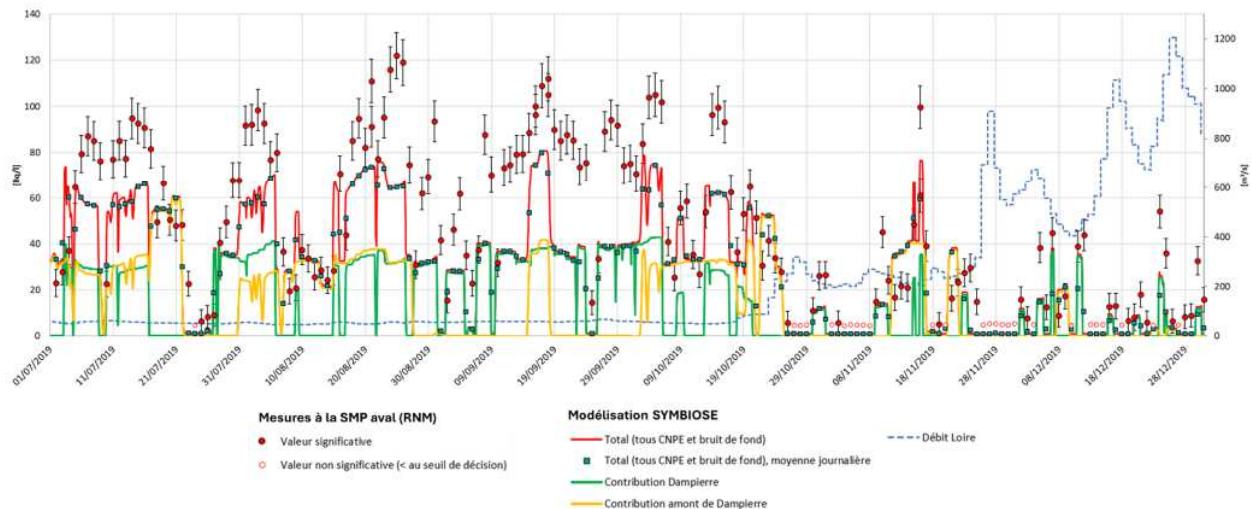


Figure 27 : Exemple de comparaison modèle/mesures d'activités volumiques de ^3H à une SMP aval (site de Dampierre, 2nd semestre 2019)

Ces graphes permettent d'évaluer la cohérence modèle-mesures globale, de dégager des tendances générales concernant les capacités de détection et la représentativité des SMP aval, et enfin d'identifier d'éventuelles singularités.

Détection des rejets du CNPE surveillé

Pour repérer les éventuels défauts de détection des rejets du CNPE surveillé par sa SMP aval, on s'intéresse aux mesures inférieures au SD quand le modèle 1D prévoit que ces rejets entraînent à eux seuls une activité volumique de tritium supérieure au SD : de telles situations peuvent traduire un problème de modélisation ou être le signe d'un défaut de détection des rejets par la SMP aval, en particulier si cette situation se reproduit fréquemment. Les comparaisons présentées en annexe 8.3 permettent en général de distinguer s'il s'agit d'un défaut de détection de la SMP ou d'un défaut de modélisation, ces derniers pouvant être mis en évidence par des décalages temporels entre les fronts modélisés et mesurés des panaches des rejets émis par le CNPE.

La fréquence d'apparition de cette situation est donnée par le pourcentage des activités volumiques mesurées inférieures au SD alors que les activités volumiques modélisées dues au CNPE surveillé sont supérieures au SD. Pour faciliter le calcul de cet indicateur, le SD étant propre à chaque mesure, on calcule le pourcentage des activités volumiques mesurées

inférieures au SD alors que les activités volumiques modélisées dues au CNPE surveillé sont supérieures à 5 Bq/L (en tenant compte d'un bruit de fond de 1 Bq/L), proche de sa valeur moyenne entre sites et sur la période d'étude.

Pour caractériser la capacité de la SMP aval à détecter les rejets de son CNPE, une analyse rigoureuse consisterait à s'intéresser à cette fréquence lorsque les rejets du CNPE surveillé sont les seuls attendus au niveau de la SMP aval. En effet, dans le cas des CNPE de Dampierre-en-Burly, Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon, le passage des panaches des rejets des CNPE situés en amont pourraient induire une mesure supérieure au SD alors même que les rejets du CNPE surveillé ne sont pas détectés : la prise en compte de ces situations pourrait donc diminuer la fréquence des défauts de détection du CNPE surveillé. Cependant, pour ces CNPE, le CNPE surveillé est rarement le seul contributeur à l'activité volumique attendue, du fait du fréquent passage de rejets de CNPE situés en amont. Afin d'obtenir suffisamment d'occurrences pour permettre l'étude, seules sont exploitées les situations où le CNPE surveillé est le « principal » contributeur⁶ à l'activité totale attendue, supérieure à 5 Bq/L.

Pour identifier les éventuelles périodes de défauts de détection des rejets, cette fréquence est calculée mois par mois entre janvier 2017-avril 2021 (exemple de la Figure 28).

Pour identifier si les défauts de détection dépendent du régime hydraulique, l'analyse est également menée par classe de débits sur toute la période de l'étude. Pour cela, une classe de débit du cours d'eau au niveau de la SMP est associé au jour de leur mesure. Dix classes ont été définies sur la gamme des débits autorisés pour les rejets d'effluents : [0, 50 m³/s], [50, 100 m³/s], [100, 200 m³/s], [200, 300 m³/s], [300, 400 m³/s], [400, 500 m³/s], [500, 750 m³/s], [750, 1000 m³/s], [1000, 1500 m³/s] et [plus de 1500 m³/s].

Sur les 2 types de graphes (par mois et par classe de débits), le nombre reporté à côté d'un point représente l'effectif des mesures utilisées, c'est-à-dire le nombre de mesure inférieures au SD alors que le modèle attend une activité en ³H supérieure à 5 Bq/L et que le CNPE surveillé est le principal contributeur. Plus ce nombre est élevé, plus l'interprétation du pourcentage calculé peut être considéré comme robuste.

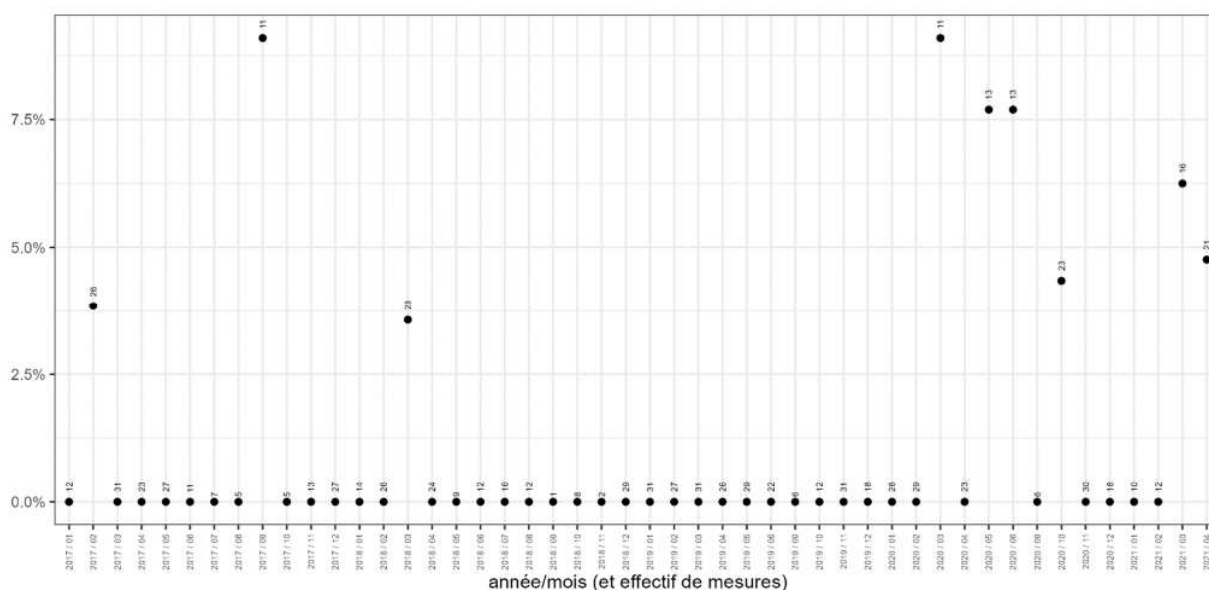


Figure 28 : Exemple de graphe du pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision pendant les rejets du CNPE surveillé (ici Civaux) quand il est le principal contributeur à l'activité volumique attendue qui est supérieure à 5 Bq/L, par mois entre janvier 2017 et avril 2021

Cet exemple d'analyse des mesures à la SMP aval du CNPE de Civaux permet de constater que sur la période étudiée, le pourcentage mensuel de mesures inférieures au SD quand la modélisation attend une activité supérieure à 5 Bq/L, donc a priori mesurable, est toujours inférieure à 10% et est nul pour la plupart des mois. Pour les mois où ce pourcentage est non nul, le nombre rapporté en regard du point sur le graphe indique l'effectif de mesures pour lesquelles la modélisation attendait une activité supérieure à 5 Bq/L, ce qui permet de connaître le nombre de mesures inférieures au SD : par exemple pour le mois de février 2017, le niveau d'environ 3,8% est obtenu à partir de 26 mesures rapportés des jours où la

⁶ Le CNPE surveillé sera dit principal contributeur lorsque l'activité volumique de tritium induite par ses rejets est au moins le double de celle induite par les rejets des CNPE situés à l'amont, le cas échéant.

modalisation attend une activité supérieure à 5 Bq/L, ce qui correspond au final à une seule mesure inférieure au SD dans cette situation pour le mois de février.

Ce recensement permet ensuite, à l'aide des courbes de comparaison modèle 1D -mesure de l'annexe 8.3, d'identifier individuellement les occurrences de mesures inférieures au SD quand le modèle attend une valeur a priori supérieure, et d'étudier s'il s'agit ou pas d'un cas de défaut de détection par la SMP aval du passage d'un rejet du CNPE.

— Représentativité des mesures vis-à-vis des rejets du CNPE surveillé

Un bon indicateur de la représentativité des échantillons fournis par une SMP aval pour vérifier le respect des activités volumiques maximales prescrites, est le coefficient de dilution liquide⁷ (CDL) au point de prélèvement de la SMP aval, qui fait partie des données qu'EDF détermine dans ses études de dilution lors de campagnes de traçage liquide menées en général pour un débit d'étiage et un débit au module⁸ et parfois pour d'autres débits.

Dans notre étude, une analyse rigoureuse de la représentativité d'une SMP aval vis-à-vis des rejets de son CNPE consisterait à s'intéresser au rapport $\frac{\text{mesure } (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ quand le modèle prévoit que l'activité volumique est exclusivement due aux rejets de son CNPE. Cependant, dans le cas de Dampierre, Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon, ces situations sont très rares du fait du fréquent passage des panaches des rejets de CNPE situés en amont. Afin d'obtenir suffisamment d'occurrences pour permettre l'étude de ces sites, seules sont exploitées les situations où le CNPE surveillé est le « principal » contributeur à l'activité totale attendue. Ce rapport s'apparente alors au CDL au point de prélèvement de la SMP aval.

- Une valeur proche de 1 signifie que le modèle et la mesure sont en accord et que le prélèvement est représentatif de la concentration au mélange homogène, ce qui n'implique pas que le mélange soit effectivement homogène car les CDL peuvent ne pas être égaux à 1 en tout point de la section.
- Une valeur inférieure à 1 indique que le modèle surestime la mesure, ce qui peut être le signe d'une erreur de modélisation et/ou d'un prélèvement effectué en limite de panache dans une zone où les rejets ne sont pas complètement mélangés.
- Une valeur supérieure à 1 indique que le modèle sous-estime la mesure, ce qui peut être le signe d'une erreur de modélisation et/ou d'un prélèvement effectué dans une zone où les rejets ne sont pas complètement mélangés et plutôt vers le centre du ou des panaches émis par les différents CNPE impliqués.

Par convention dans cette étude, on dira que la SMP aval fournit des échantillons représentatifs au regard des objectifs indiqués précédemment si les coefficients de dilution sont supérieurs ou proches de 1.

Pour identifier les tendances de ce rapport en fonction des classes de débits précédemment définies, les mesures sélectionnées sont regroupées en fonction de ces classes, puis une analyse statistique est effectuée sur chacune d'elles, restituée sous la forme de boîte à moustache comme illustré sur l'exemple de la Figure 29.

⁷Le coefficient de dilution en un point d'une section de cours d'eau est égal au rapport $\frac{\text{Activité mesurée}_{\text{point en aval du rejet}} - \text{Activité mesurée}_{\text{amont du rejet}}}{\text{Activité ajoutée attendue}}$, où l'activité ajoutée attendue est égale à l'activité moyenne ajoutée, calculée après mélange complet des rejets du CNPE surveillé dans le débit du cours d'eau. EDF le détermine dans ses études de dilution pour différents points en travers de la rivière, à différentes distances en aval de l'ouvrage de rejet, afin d'étudier la dispersion des rejets.

⁸ Débit moyen pluriannuel du cours d'eau en un point.

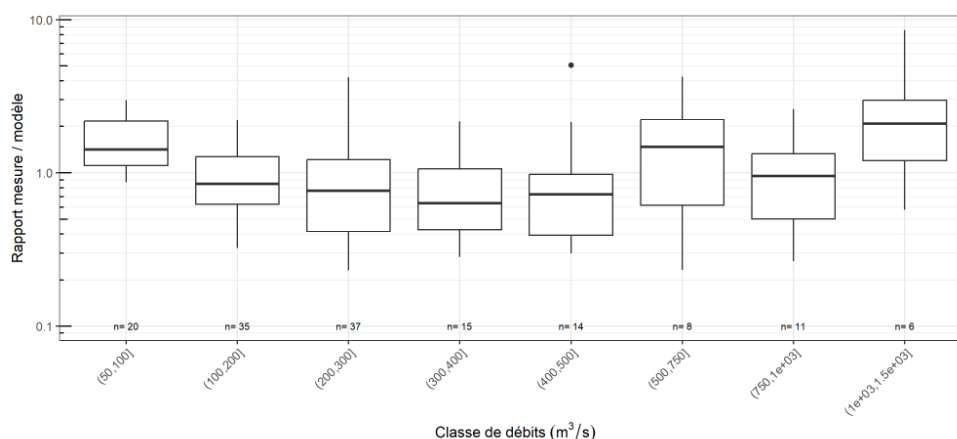


Figure 29 : Exemple du rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval d'un CNPE, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L et que le CNPE surveillé en est le principal contributeur

Pour chaque classe de débit, les boîtes à moustaches permettent de visualiser la valeur médiane du rapport (trait horizontal à l'intérieur de la boîte) et les premier et troisième quartiles (charnières inférieure et supérieure respectivement de la boîte). La moustache supérieure s'étend du haut de la boîte (« charnière ») jusqu'au rapport le plus grand rencontré mais en se limitant à $1,5 \times \text{IQR}$ de la charnière supérieure, où IQR est l'intervalle interquartile, ou la « distance » entre le premier et le troisième quartile. La moustache inférieure s'étend de la charnière inférieure jusqu'au plus petit rapport d'au plus $1,5 \times \text{IQR}$ de la charnière inférieure. Les éventuelles données situées au-delà de l'extrémité des moustaches sont appelées points « éloignés » et sont représentées individuellement par des points. Enfin, le nombre de mesures utilisées pour générer chaque boîte à moustaches figure au-dessus de l'axe des abscisses, précédé de la mention « n = » : plus ce nombre est élevé, plus les statistiques résumées par la boîte à moustaches peuvent être considérées comme robustes.

Représentativité des échantillons vis-à-vis des rejets des CNPE en amont du CNPE surveillé

Dans le cas des SMP aval des CNPE de Dampierre, Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon, le tritium mesuré dans les prélèvements peut provenir à la fois des rejets liquides du CNPE surveillé et des CNPE situés en amont. Dans le cadre de cette étude il est intéressant d'analyser la façon dont les activités des échantillons fournis par ces SMP aval sont influencées par les rejets des CNPE amont, afin d'améliorer l'interprétation de leurs mesures.

Pour ce faire, les méthodes de comparaison entre les mesures et les modélisations 1D présentées précédemment sont mises en œuvre pour les situations où le CNPE surveillé ne rejette pas et où la modélisation prédit que les rejets des CNPE amont induisent une activité volumique supérieure à 5 Bq/L (en tenant compte d'un bruit de fond de 1 Bq/L).

Modélisation du profil latéral des activités volumiques

Après sa calibration (Annexe 8.4), le code de calcul CASTEAUR2D est appliqué aux tronçons de rivière compris entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval de chaque site et pour les bornes supérieures des classes de débits investiguées par le modèle 1D : 50, 100, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, et 1500 m³/s.

L'hypothèse de régime permanent des rejets et des conditions hydrauliques ne permet pas au modèle 2D de traiter des chroniques de rejet comme le fait le modèle 1D. Son apport à cette étude consiste à évaluer et à caractériser, en fonction des conditions hydrauliques, la répartition transversale des coefficients de distribution liquide (CDL) aux sections des SMP aval des différents sites.

Pour cela, les résultats du modèle 2D présentés dans ce rapport sont :

1. les distributions transversales, pour différentes conditions de débit, des CDL modélisés au droit des SMP aval comme illustré ci-dessous.

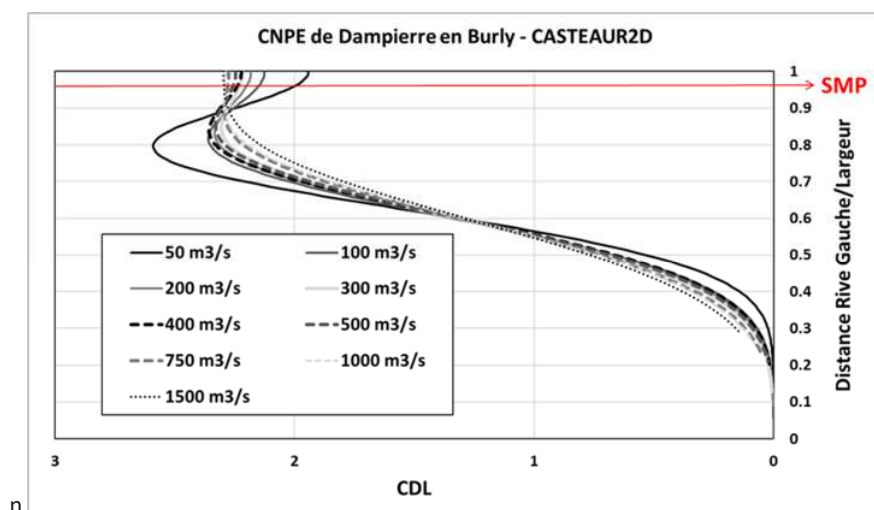
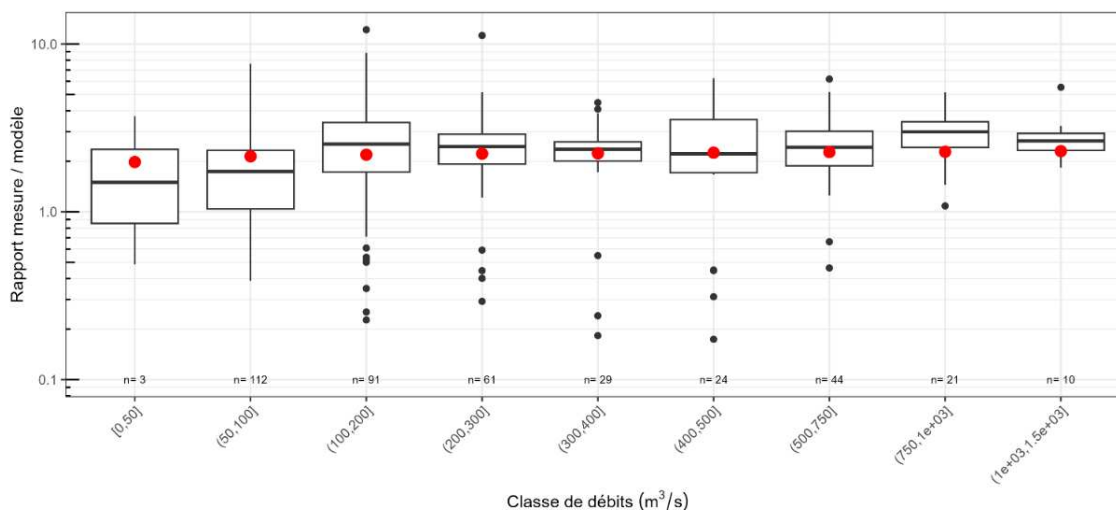


Figure 30 : Exemple de modélisation 2D de CDL au droit d'une SMP aval (cas du CNPE de Dampierre-en-Burly)

Cette figure illustre la modélisation 2D des évolutions transversales des CDL pour différentes conditions de débit et au droit d'une SMP aval, en l'occurrence celle du CNPE de Dampierre-en-Burly. L'axe des ordonnées indique la distance à la berge gauche dimensionnée par la largeur de la rivière, l'axe des abscisses donne les valeurs des CDL et chaque courbe correspond à une condition de débit. La flèche rouge coupe l'axe des ordonnées à la distance à la berge gauche du point de prélèvement de la SMP aval et ses intersections avec les différentes courbes indiquent les CDL qui y sont modélisés pour chacun des débits investigués.

- La comparaison des CDL modélisés aux points de prélèvement des SMP aval (flèche rouge) à ceux donnés par les analyses 1D pour les différentes classes de débit.



-

Figure 31 : Exemple de comparaison en fonction des classes de débit des CDL issus de la modélisation 2D au point de prélèvement d'une SMP aval à ceux donnés par l'analyse 1D (cas du CNPE de Dampierre-en-Burly)

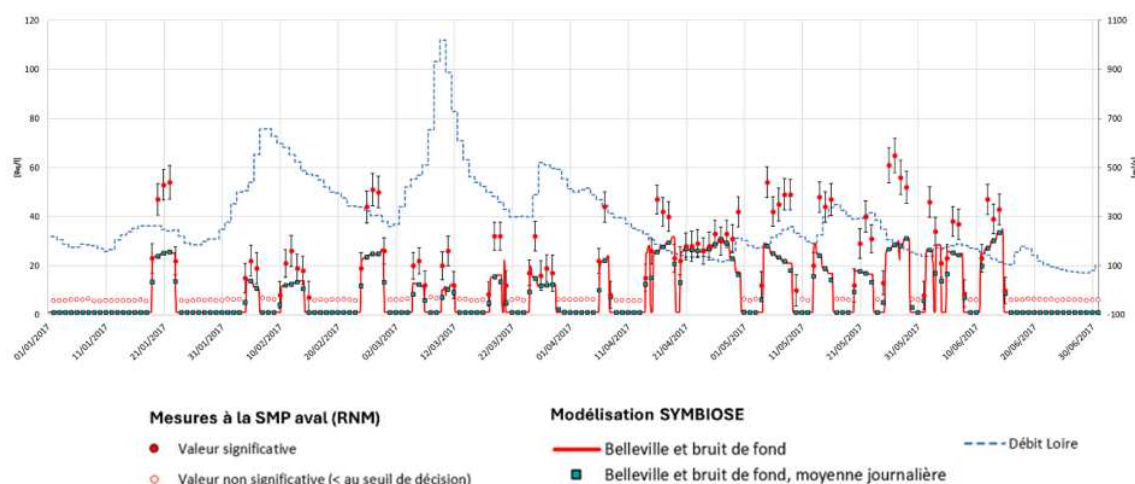
Ces résultats complètent les analyses issues du modèle 1D en apportant des informations sur la répartition transversale des CDL pour affiner la caractérisation des conditions de mélange aux sections des SMP aval, contextualiser les CDL au point de prélèvement et renforcer l'évaluation de la représentativité des SMP aval vis-à-vis des rejets de leurs CNPE.

ANALYSE PAR SITE

4.1 BELLEVILLE

— Comparaison modèle-mesures

Pour le site de Belleville, la Figure 81 de l'annexe 8.3 montre un bon accord global entre les activités volumiques mesurées et celles calculées par le modèle, notamment pour les débits de la Loire les plus faibles. Lorsque les débits croissent, les mesures sont supérieures au modèle, jusqu'à environ un facteur 2. Cette comparaison suggère que les échantillons prélevés par la SMP aval de ce site permettent toujours la détection des rejets du CNPE et que le point de prélèvement est placé dans le panache des rejets du CNPE quel que soit le débit. A titre d'illustration, un extrait de la figure précitée est reproduit dans la Figure 32 ci-après.



— Détection des rejets du CNPE de Belleville

La faible proportion des mesures inférieures au seuil de décision pendant les rejets du CNPE de Belleville avec des niveaux attendus supérieurs à 5Bq/L montre que sa SMP aval détecte quasi- systématiquement ses rejets (Figure 33).

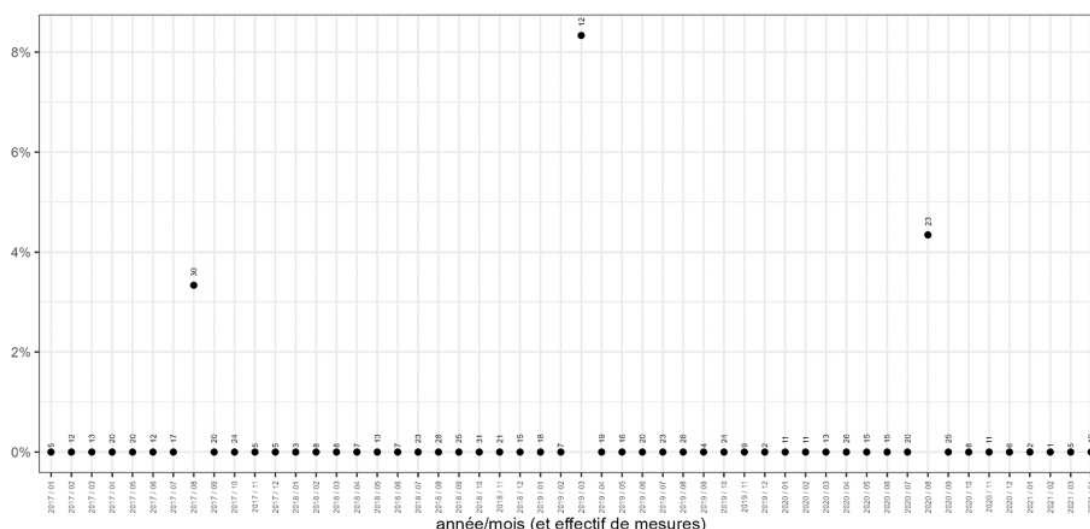


Figure 33 : Pourcentages mensuels des mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire pendant les rejets du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021

Seules 3 occurrences de niveaux attendus supérieurs à 5 Bq/L ont donné lieu à une mesure inférieure au SD :

- le 02/08/2017 avec une activité volumique attendue par la modélisation à 6,25 Bq/L pour un SD de 6,2 Bq/L, ce qui n'est pas un écart significatif,
- le 13/03/2019 avec une activité volumique attendue par la modélisation à 5,7 Bq/L pour un SD de 6,9 Bq/L, de sorte qu'il ne s'agit pas d'un défaut de détection (mais de l'effet du seuil de 5 Bq/L retenu pour l'indicateur, qui est ici inférieur au SD de la mesure),
- et le 11/05/2020, avec un SD à 5,74 Bq/L et une activité volumique prédite à 11,64 Bq/L, lors de l'arrivée d'un front de rejet. S'agissant d'une singularité unique, survenue pour un débit très faible ($\sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$) (Figure 34), le désaccord entre le modèle et la mesure est sans doute dû à un biais de modélisation des vitesses de transfert aux faibles débits de la Loire.

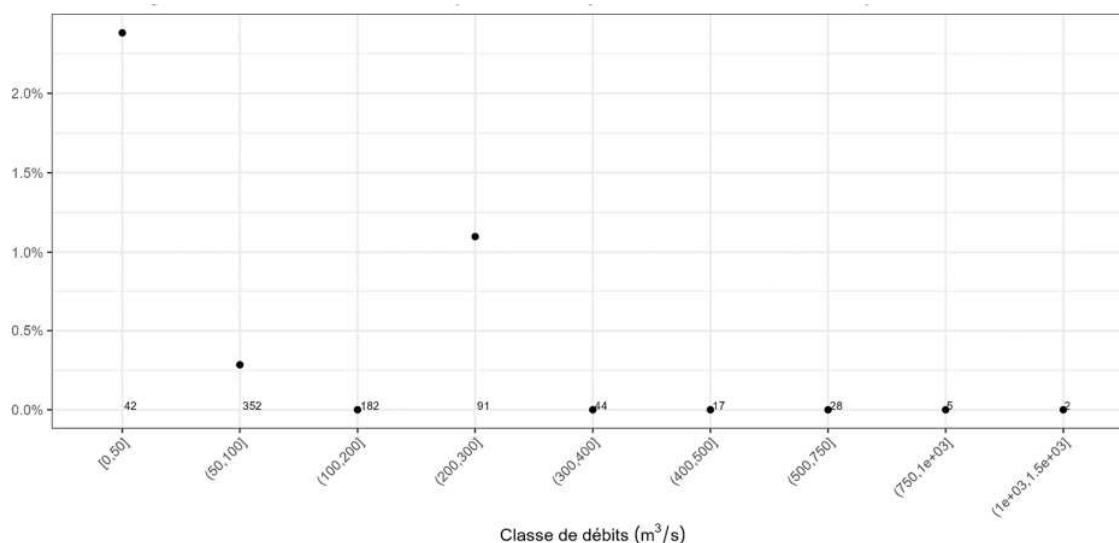


Figure 34 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire pendant les rejets du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Représentativité des mesures vis-à-vis des rejets du CNPE de Belleville

Le rapport $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ par classes de débits est en général supérieur à 1 (les médianes sont supérieures à 1 et le premier quartile presque toujours) (Figure 35). Il est proche de 1 pour les débits les plus faibles ($< 100 \text{ m}^3/\text{s}$), ce qui pourrait suggérer une situation de mélange complet des rejets de Belleville au niveau de la SMP aval. Il croît ensuite avec les débits, jusqu'à des valeurs comprises entre 2 et 3, ce qui est caractéristique d'un prélèvement de la SMP aval dans une zone de mélange incomplet mais bien situé dans le panache et du côté des valeurs élevées.

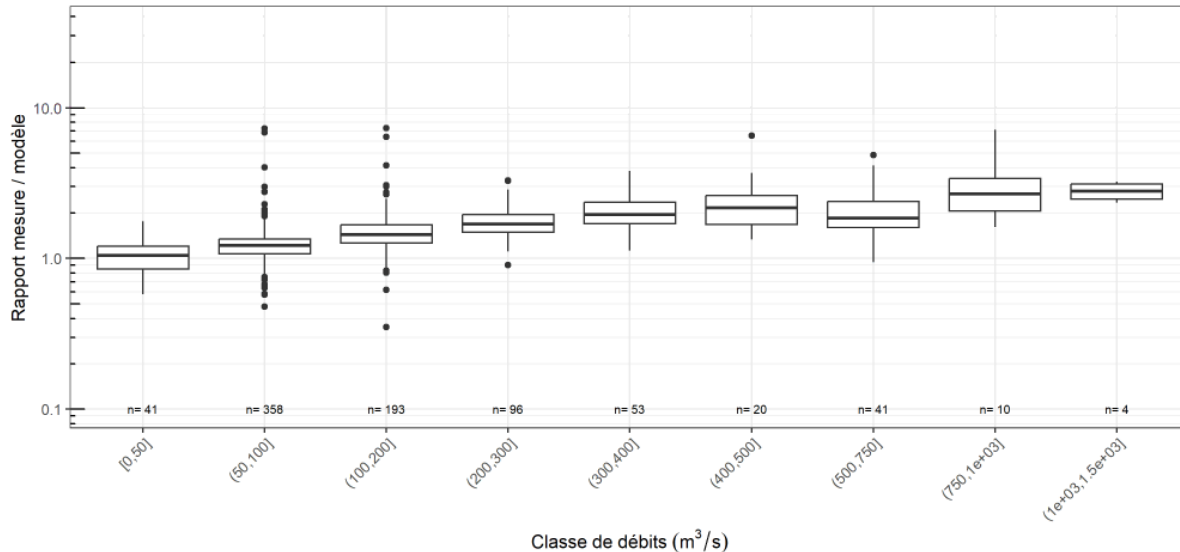


Figure 35 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, pendant les rejets du CNPE

Les études de dilution d'EDF sur Belleville [6] indiquent que le prélèvement de la SMP aval se fait dans la zone où le CDL est maximal et que ce CDL maximal (CDL_{max}) observé par EDF parmi les points échantillonnés sur la section au droit de la SMP aval est :

- de 1,0 et 0,9 aux débits proches de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les campagnes du 24/6/2014 et 6/10/2016 respectivement,
- de 2,4 et 1,7 aux débits proches de $320 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les campagnes du 11/12/2014 et 7/4/2017 respectivement.

Il est à noter que la campagne de 2014 s'est faite avec un rejet par la seule clarinette du côté de la SMP aval (rive gauche), ce qui implique une homogénéisation plus lente du panache et un CDL à la SMP aval plus élevé que celui attendu pour un rejet effectué à partir des deux clarinettes. A contrario, on peut s'attendre à ce qu'un rejet par la seule clarinette du côté de la rive droite amènerait un CDL plus bas à la SMP aval.

La médiane du rapport $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ vaut 1,2 pour la classe de débit $[50 ; 100 \text{ m}^3/\text{s}]$ et 1,9 pour la classe de débit $[300, 400 \text{ m}^3/\text{s}]$; ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude EDF présentés ci-dessus pour un rejet effectué par les deux clarinettes.

Modélisation du profil latéral des activités volumiques

La Figure 36 présente la modélisation de l'évolution de la distribution transversale des CDL dans les deux bras de la Loire au droit de la SMP aval en fonction du débit.

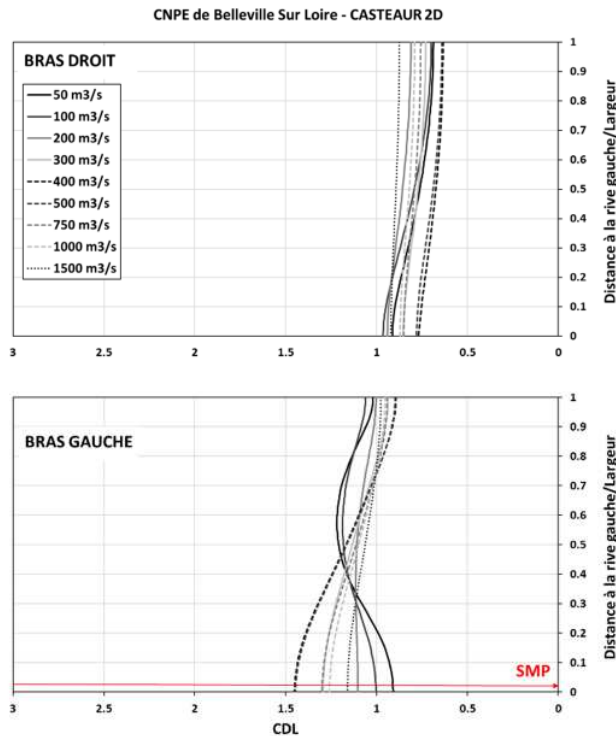


Figure 36 : Distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Belleville sur Loire

Lorsque le débit est inférieur à 200 m³/s, le pic du panache est au centre du bras à gauche de la digue centrale et la SMP capte le bord gauche caractérisé par des CDL proches de 1 qui pourraient laisser croire que les conditions de mélange sont vérifiées. Quand le débit augmente, le pic se décale vers la berge gauche et les CDL au niveau du point de prélèvement de la SMP montent jusqu'à 1.4 lorsque le débit avoisine 500 m³/s. Pour des débits plus forts, pour lesquels le code 2D n'a pas pu être calibré, les calculs suggèrent que le pic reste en rive gauche et que les CDL à la SMP diminuent en raison de l'élargissement de la veine d'eau.

En complément, la Figure 37 compare les CDL modélisés par le modèle 2D au point de prélèvement de la SMP aval à ceux estimés avec le modèle 1D ; ces deux approches montrent des résultats globalement cohérents jusqu'à un débit de 400 m³/s et différent au-delà qui pourraient s'expliquer par le manque de calibration du modèle 2D à ces régimes, en particulier vis-à-vis des conditions de noyage de la digue centrale, et/ou par la plus faible représentativité statistique des CDL en raison du nombre restreint de mesures exploitées.

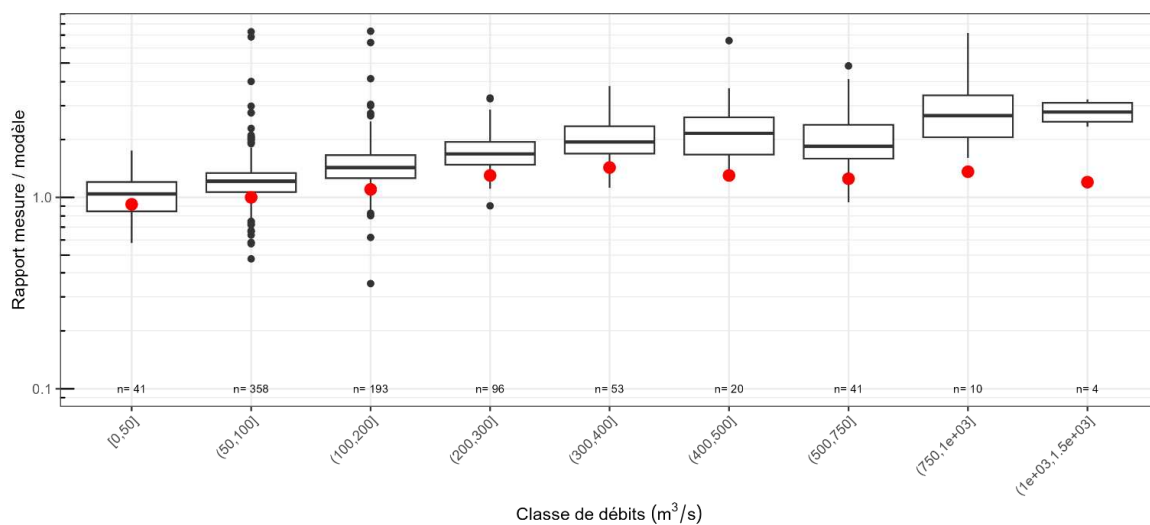


Figure 37 : CDL à la SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire (modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D)

Ces résultats montrent que le mélange n'est pas homogène à la SMP aval du CNPE de Belleville et que les prélèvements de la SMP aval sont bien effectués dans la veine de rejet dès lors que les rejets sont réalisés par les deux clarinettes.

Synthèse

Sur la période étudiée, les rejets de Belleville ont été effectués par les deux clarinettes de rejet (fonctionnement nominal de l'installation) et ont été détectés dans les échantillons prélevés par la SMP aval quel que soit le débit de la Loire. Pour des débits d'étiage, les rapports $\frac{\text{mesure } (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ sont égaux à 1 mais les conditions de mélange homogène ne sont pas vérifiées. De façon générale, les CDL à la SMP aval sont compris entre 1 et 2 quel que soit le débit, ce qui est caractéristique d'un prélèvement dans une zone de mélange incomplet des rejets, mais bien dans le panache. Ces résultats sont cohérents avec les études de dilution d'EDF à l'étiage et au module.

L'étude n'a pas permis d'investiguer les cas de rejet par une seule clarinette mais deux études d'EDF réalisées au module et à l'étiage pour des rejets par la seule clarinette en rive gauche indiquent que le prélèvement à la SMP aval reste dans le panache.

La représentativité de la SMP aval pour des rejets qui seraient effectués par la seule clarinette côté rive droite n'est pas connue.

4.2 DAMPIERRE-EN-BURLY

Comparaison modèle-mesures

La comparaison fait apparaître des comportements très différents sur deux périodes : l'une entre mi-janvier 2017 et début novembre 2017, et l'autre sur le reste de la période étudiée (Figure 82 de l'annexe 8.3, dont un extrait est reproduit dans la Figure 39 ci-dessous). Entre mi-janvier 2017 et novembre 2017, les rejets du CNPE de Dampierre-en-Burly semblent parfois ne pas être détectés et lorsqu'ils le sont, les mesures sont bien inférieures aux niveaux attendus par la modélisation, suggérant un manque de représentativité de la SMP aval. En dehors de cette période de 2017, les rejets du CNPE semblent bien détectés et les mesures sont représentatives des rejets dans la mesure où elles sont supérieures à l'activité volumique après homogénéisation complète dans le débit de la Loire, d'un facteur souvent supérieur à 2.

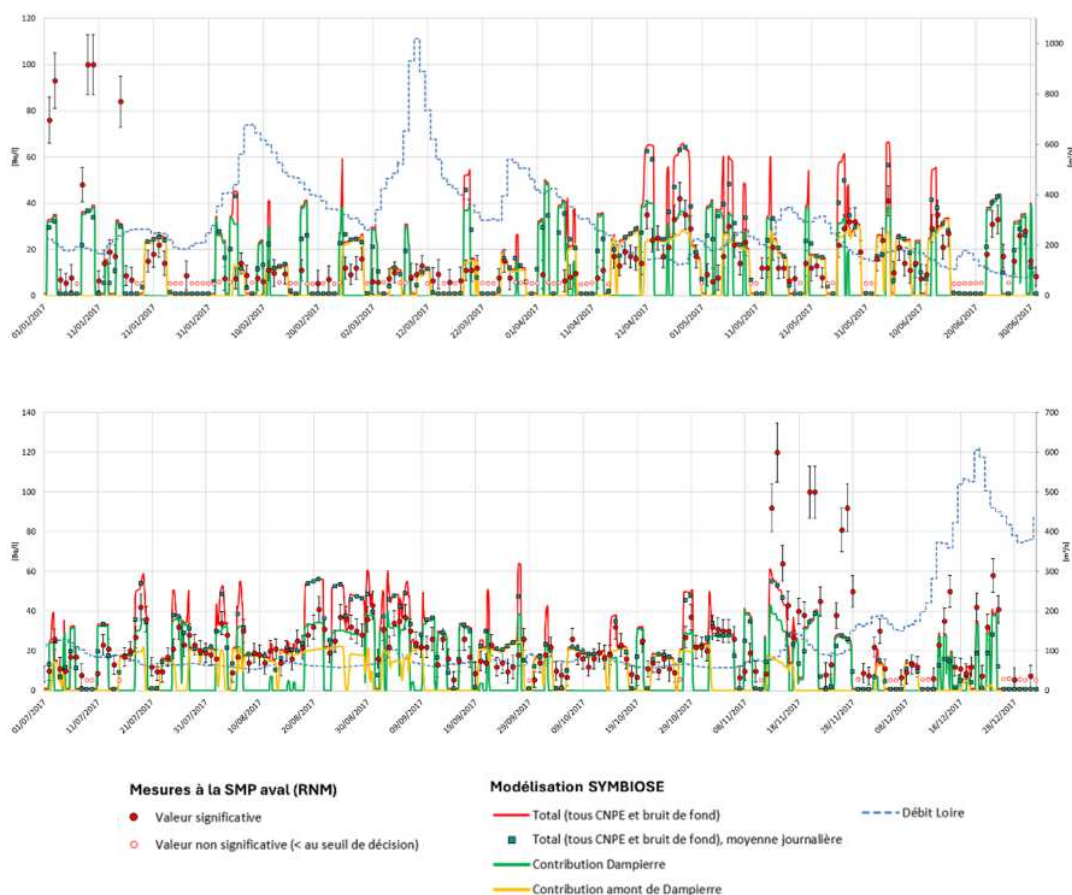


Figure 38 : Comparaison des mesures d'activités volumiques de ^3H aux prévisions du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly en 2017

L'observation des mesures de tritium à la SMP aval du CNPE de Dampierre sur une période plus longue, via les chroniques mises à disposition sur le site du RNM, laisse apparaître des niveaux inhabituellement bas pendant plusieurs mois de l'année 2017 en comparaison aux autres années (Figure 39).

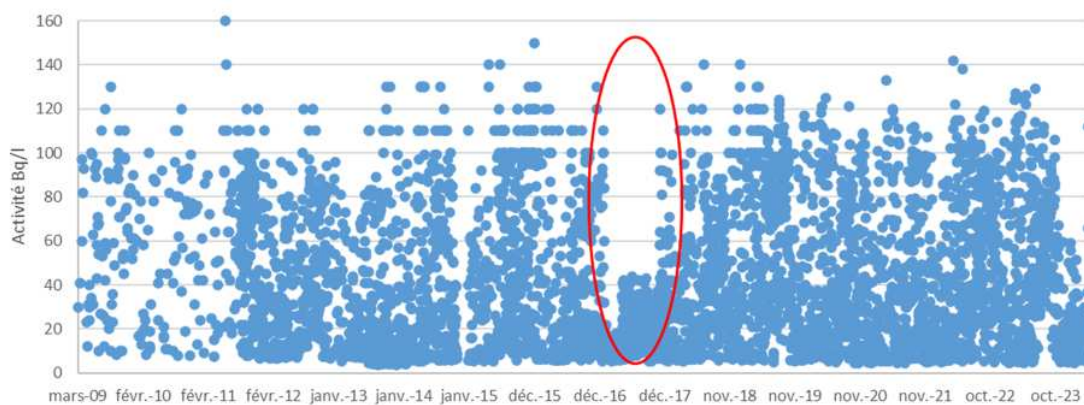


Figure 39 : Activités volumiques de tritium (Bq/L) mesurées à la SMP aval de Dampierre-en-Burly entre 2009 et 2021, extraites du RNM

L'analyse plus précise de l'année 2017 montre que la dernière mesure au niveau 'habituel' date du 15/01 et la première valeur inhabituelle du 01/02/2017 (pas de rejet significatif du CNPE Dampierre entre ces deux dates) ; à partir du 12/11/2017, les valeurs mesurées sont à nouveau habituelles (Figure 38). Il n'y a pas eu entre février et novembre 2017 de baisse des rejets émis par le CNPE de Dampierre (Figure 80) ou de hausse des débits qui puisse expliquer cette observation.

Deux éléments sont à signaler sur cette période :

- EDF a déclaré un évènement significatif pour l'environnement, ESE 9 n° 0.14.17, précisant que le 12/11/2017 la vanne O KER 602 VE, censée être ouverte, est découverte fermée. Cette vanne est donc réouverte le 12/11/2017. EDF indique que la vanne était restée fermée depuis le 16/09/2016 (dernière manipulation connue), impliquant que les effluents liquides du CNPE n'ont été rejetés que par la clarinette la plus éloignée de la rive droite où est située la SMP aval, entre le 16/09/2016 et le 12/11/2017 ;
- des opérations de dragage du canal d'amenée ont eu lieu au cours du premier semestre 2017, au cours desquelles les sédiments dragués ont été restitués en Loire en aval immédiat des rejets en rive droite. Le compte-rendu de cette opération transmis par EDF à l'ASN indique que les opérations se sont déroulées en plusieurs phases sur un total de 57 jours pour une restitution en Loire d'environ 30 200 m³ de sédiments, avec une première phase du 26 janvier 2017 au 3 février 2017, pendant laquelle les sédiments curés présentaient une granulométrie sableuse fine avec une proportion importante de graviers et de cailloux.

La coïncidence de la date de réouverture de la vanne le 12/11/2017 et la reprise des activités habituellement mesurées suggère que la faiblesse des niveaux observée survient lorsque les rejets des effluents ne s'effectuent que par la clarinette la plus éloignée de la rive droite où se situe la SMP aval, les prélèvements se faisant sans doute alors en limite du panache des rejets. Cependant, cette configuration de rejet ayant débuté le 16/09/2016, elle ne peut expliquer seule la baisse des activités mesurées survenue entre le 15/01/2017 et le 01/02/2017. C'est donc vraisemblablement la conjugaison de cette configuration de rejet et de la restitution en Loire de sédiments dragués à compter du 26/01/2017 qui explique les faibles activités mesurées. En faisant l'hypothèse que le volume dragué et restitué est uniformément réparti sur les périodes d'opérations de dragage, on peut supposer, en première approximation, qu'environ 3 700 m³ de sédiments ont été restitués entre le 26 janvier et le 1er février 2017. Ces sédiments, avec une proportion élevée de graviers et de cailloux, restitués en aval immédiat des rejets en rive droite auraient ainsi pu contribuer à dévier les panaches des rejets vers le centre du cours d'eau en les éloignant du point de prélèvement de la SMP aval.

Il convient de retenir de cette analyse que les modifications naturelles (e.g. par apparition ou déplacement de bancs de sable) ou anthropiques de l'écoulement de la Loire, ainsi que de la configuration des rejets, sont à même de modifier de façon conséquente la représentativité des SMP aval. Le bon positionnement d'une SMP aval devrait donc être vérifié régulièrement.

— Détection des rejets du CNPE de Dampierre

La proportion des mesures inférieures au seuil de décision montre que la SMP aval de Dampierre détecte les rejets de son CNPE, excepté sur une période comprise entre février et avril 2017 et une fois en août 2018 (Figure 40). Les occurrences de février 2017, 4 mesures sur 9, sont statistiquement significatives.

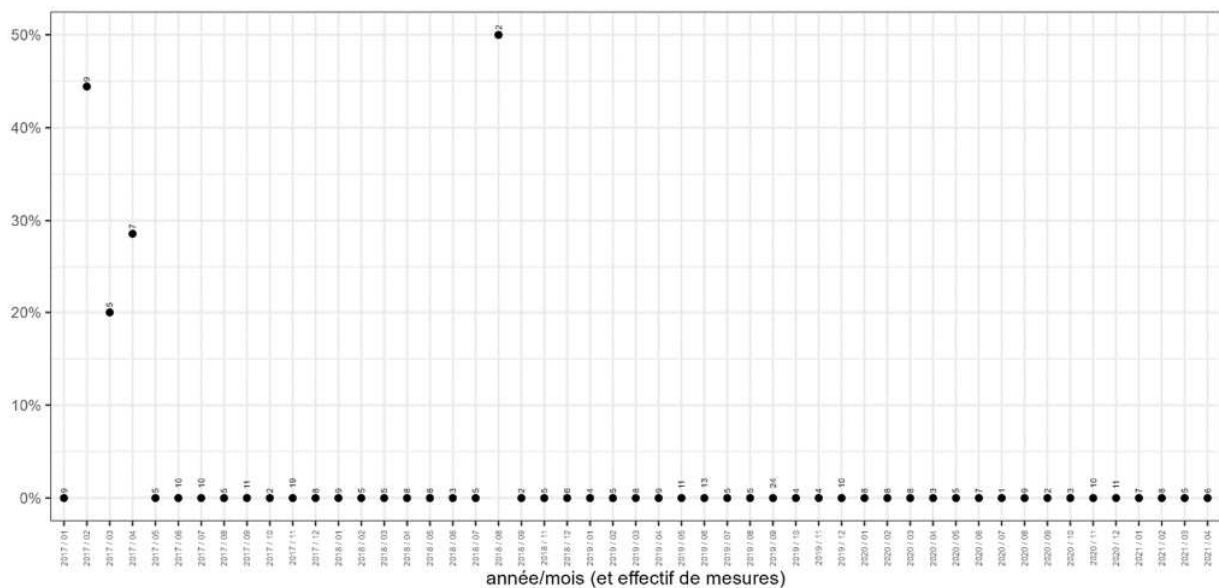


Figure 40 : Pourcentage mensuel de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval de Dampierre-en-Burly quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021

Il est à noter que les défauts de détection de la période de début 2017 ont eu lieu pour les débits compris entre 300 et 750 m³/s (Figure 41).

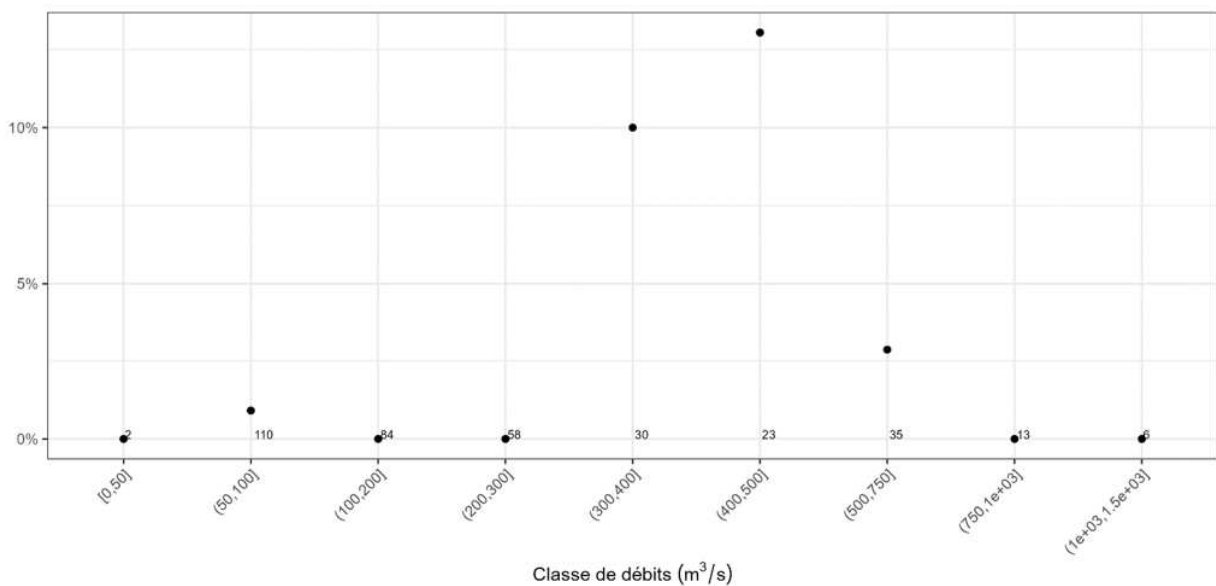


Figure 41 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Globalement, la SMP aval de Dampierre détecte bien les rejets du CNPE de Dampierre, hormis pour la période début 2017 et des débits compris entre 300 et 750 m³/s, cette période étant comprise dans la période plus large entre février et novembre 2017 discutée précédemment, pendant laquelle des niveaux inhabituellement faibles étaient mesurés, probablement du fait du rejet par la seule clarinette la plus éloignée de la rive droite de la SMP aval et de la modification vraisemblable de l'écoulement de la Loire par la restitution des sédiments dragués.

Représentativité des mesures vis à vis des rejets du CNPE de Dampierre

Du fait de l'identification précédente de la période particulière entre février et novembre 2017, avec des niveaux mesurés inhabituellement bas en lien avec le rejet par une seule clarinette et la restitution des sédiments dragués, l'analyse du rapport $\frac{\text{mesure (> SD)}}{\text{modèle 1D quotidien}}$ par classes de débits a été menée sur deux périodes distinctes : la période février -novembre 2017 d'une part, et la période janvier 2017 – avril 2021 excluant la période février-novembre 2017 d'autre part.

Sur la période février – novembre 2017, l'analyse montre un problème de représentativité des mesures vis-à-vis des rejets de Dampierre avec des rapports inférieurs à 1. Ceci s'observe à tous les débits, y compris aux faibles débits pour lesquels on dispose d'un nombre d'observations suffisamment important pour dégager une tendance fiable. Pour les débits plus élevés, ce nombre d'observations est plus faible, amenant à considérer avec précaution les statistiques du rapport.

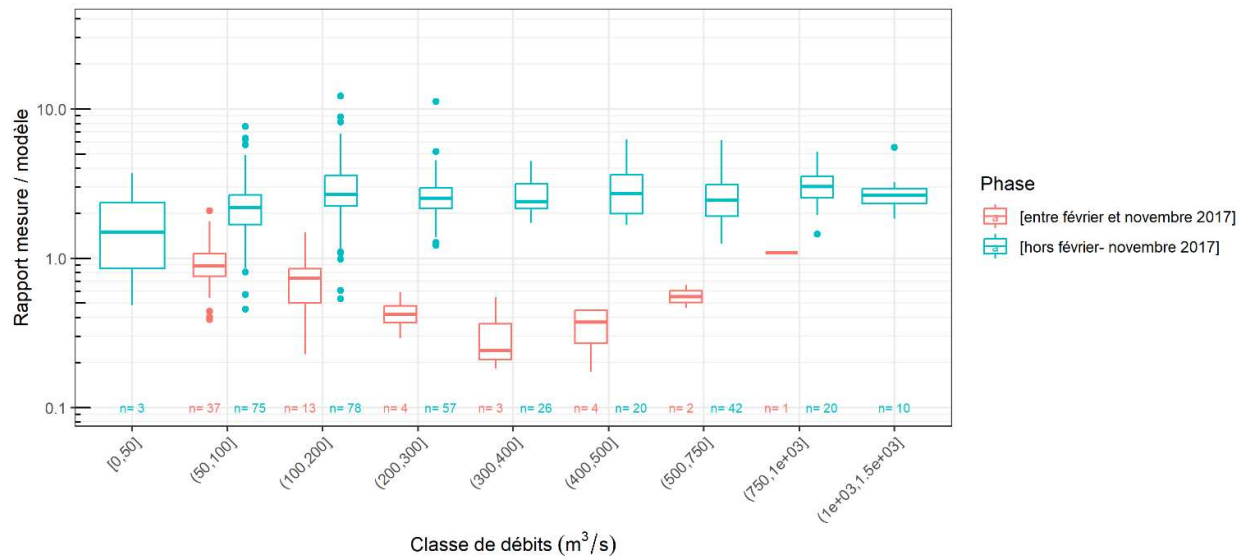


Figure 42 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, quand le CNPE en est le principal contributeur

Sur la période hors février-novembre 2017, ce rapport est en général supérieur à 1 : les médianes sont supérieures à 1 et le premier quartile l'est presque systématiquement. Ces résultats montrent que les prélèvements de la SMP aval se font bien dans le panache des rejets du CNPE de Dampierre quel que soit le débit.

Les études de dilution d'EDF [7] montrent que le prélèvement de la SMP aval est réalisé à proximité du pic des panaches où les CDL maximaux sont :

- 2,5 au débit d'étiage proche de 70 m³/s (campagne du 21/8/12)
- 2,5 au module, débit proche de 300 m³/s (campagne du 11/12/13)

Les médianes du rapport $\frac{\text{mesure (> SD)}}{\text{modèle 1D quotidien}}$ pour les classes de débits [50 ; 100m³/s], [200 ; 300m³/s] et [300 ; 400 m³/s] sont respectivement de 2,2 et 2,5 et 2,4 et sont donc compatibles avec les études d'EDF.

Détection et représentativité des mesures vis à vis des rejets des CNPE en amont du CNPE de Dampierre

La Figure 43 montre qu'en l'absence de rejets du CNPE de Dampierre, les rejets du CNPE de Belleville, situé en amont, sont bien détectés aux faibles débits mais ne le sont pas systématiquement pour des débits > 400 m³/s.

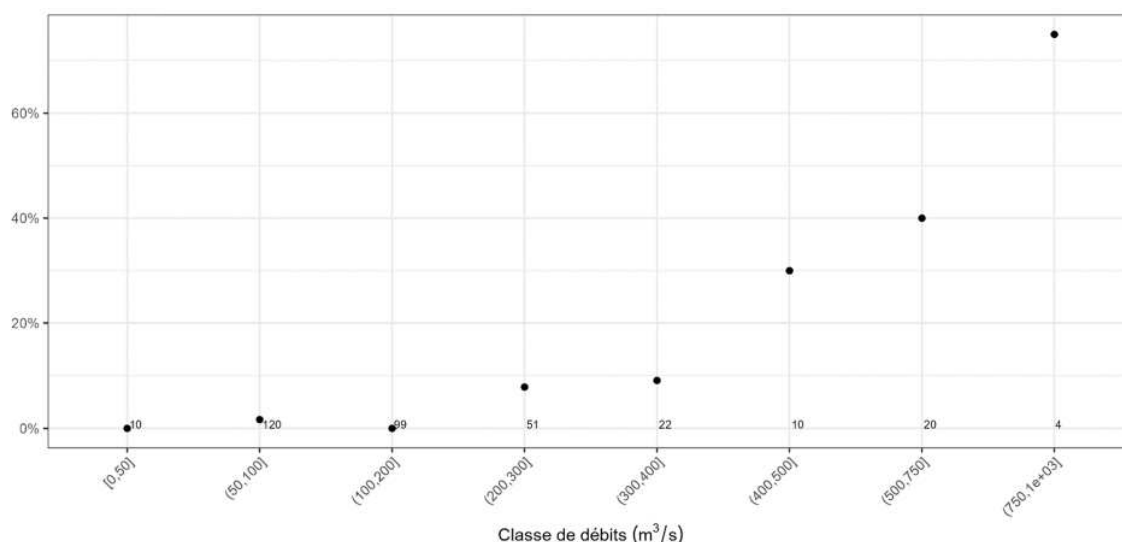


Figure 43 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due au seul CNPE situé en amont

La Figure 44 montre que le rapport $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ est en général inférieur à 1 pour les débits supérieurs à 100 m³/s.

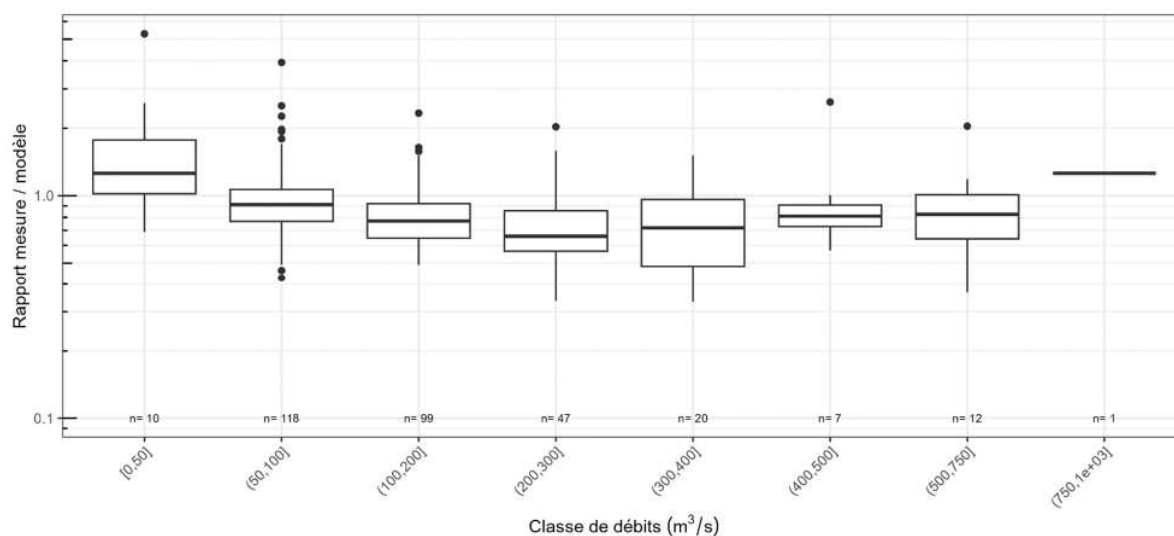


Figure 44 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont

Ces observations suggèrent que pour une large gamme de débits, la dilution des rejets du CNPE de Belleville, émis côté rive gauche de la Loire, est encore incomplète au niveau de la SMP aval de Dampierre, située côté rive droite à 45 km en aval. Ces résultats sont en accord avec l'étude dilution des rejets du CNPE de Belleville [6], qui indique une distance de dilution complète à 12 km pour un débit d'étiage (campagne à 68 m³/s) et de plus de 28 km au module (campagne à 329 m³/s) avec un panache estimé côté rive gauche.

Modélisation du profil latéral des activités volumiques

La Figure 45 ci-après présente l'évolution des distributions transversales des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly en fonction du débit et pour des conditions de rejets par les deux clarinettes.

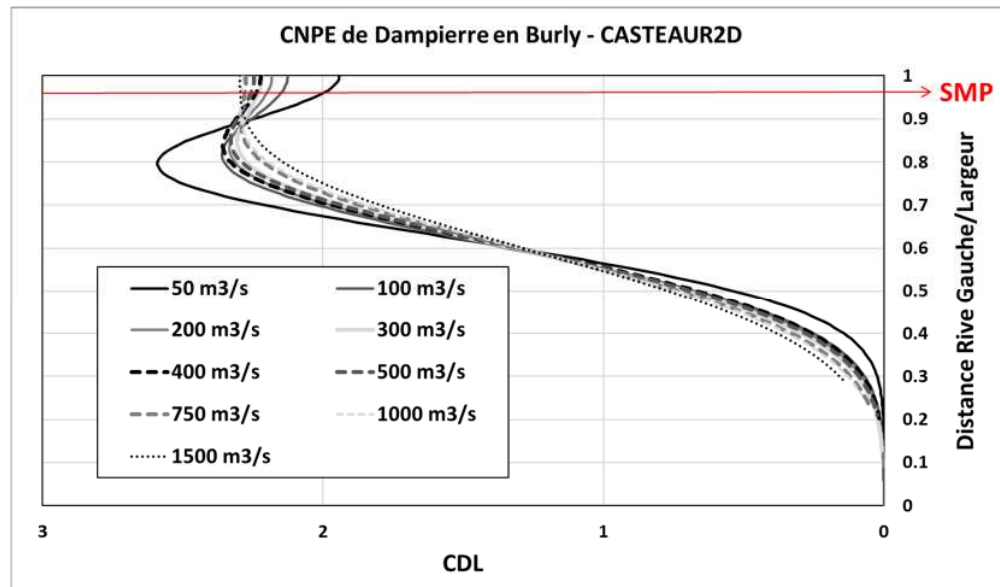


Figure 45 : Distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly

Le profil transversal des CDL au droit de la SMP aval est peu sensible aux conditions de débit. Le pic du panache reste localisé à quelques mètres de la berge droite et les CDL au point de prélèvement de la SMP aval (flèche rouge) sont légèrement inférieurs à 2 pour un débit de 50 m³/s. Ils augmentent et se stabilisent autour de 2.3 quand le débit augmente.

La comparaison entre les CDL modélisés à la SMP aval et ceux déduits du modèle 1D (en excluant la période entre février et novembre 2017) est présentée sur la Figure 46.

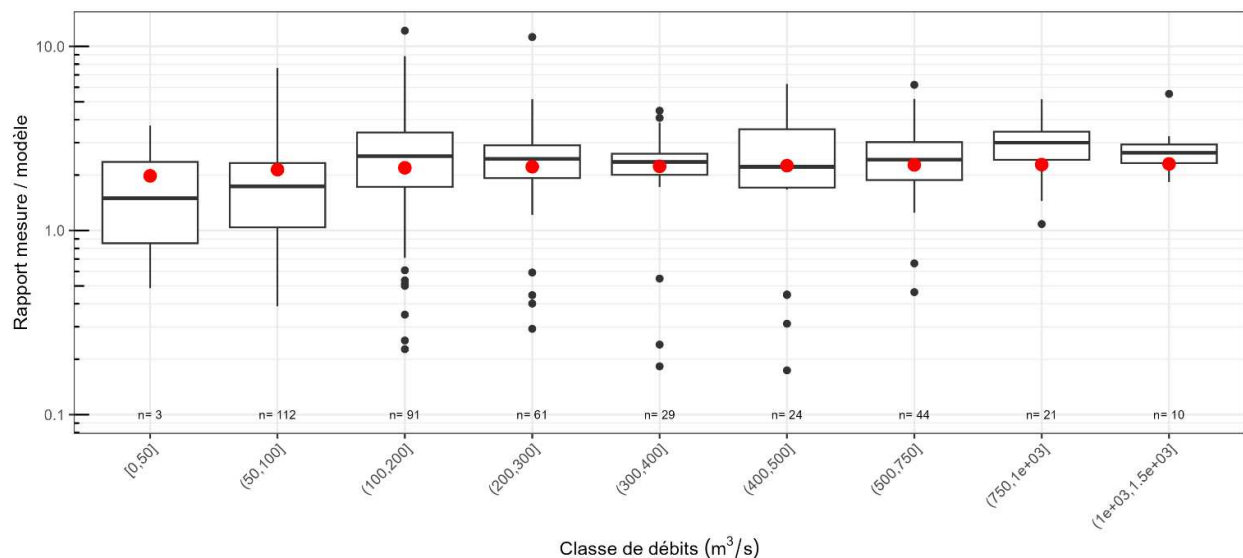


Figure 46 : CDL à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly (modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D), en excluant la période entre février et novembre 2017

Avec la configuration usuelle de rejet (deux clarinettes), les modélisations 1D et 2D indiquent des CDL proches de deux au point de prélèvement de la SMP aval, ce qui traduit que les conditions de mélange homogène n'y sont jamais atteintes mais que le prélèvement s'effectue bien dans le panache des rejets du CNPE de Dampierre-en-Burly.

Synthèse

Sur la période d'étude excluant la fenêtre de février à novembre 2017, les prélèvements de la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly sont bien représentatifs des rejets du CNPE avec un rapport $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}} > 1$ quel que soit le débit et souvent compris entre 2 et 3. Ces rapports sont cohérents avec les coefficients de dilution maximum observés par EDF au droit de cette SMP dans ses 2 campagnes de traçage, à l'étiage et au module.

En revanche, une baisse de la détection et de la représentativité des mesures de la SMP aval de Dampierre est survenue sur la période février 2017 - novembre 2017. L'explication la plus probable est la conjonction de deux événements : d'une part l'utilisation de la seule clarinette la plus éloignée de la rive droite pour les rejets, objet de l'évènement significatif pour l'environnement ESE9 n° 0.14.17, et d'autre part la restitution en Loire, en aval immédiat des rejets en rive droite, de sédiments dragués dans le canal d'amenée à partir du 26 janvier 2017. Ces événements concomitants ont éloigné la veine de rejet de la rive droite où se situe le prélèvement de la SMP aval. L'épisode invite à surveiller de façon régulière la représentativité des prélèvements des SMP aval, celle-ci pouvant être affectée par l'apparition ou le déplacement d'obstacles à l'écoulement, naturels (eg. bancs de sable) ou non, ainsi que par des modifications de la configuration de rejet.

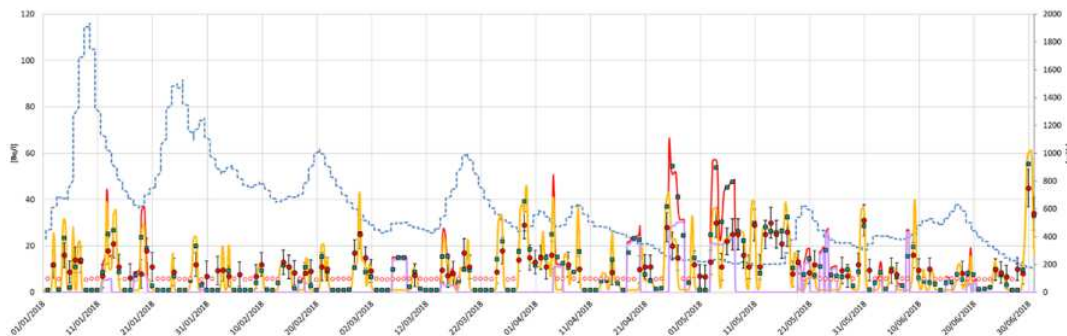
La représentativité de la SMP aval pour des rejets qui seraient effectués par la seule clarinette du côté de la SMP aval (rive droite) n'est pas connue mais on peut s'attendre à ce que les CDL y soient plus forts que ceux obtenus pour un rejet par les deux clarinettes.

4.3 SAINT-LAURENT-DES-EAUX

Comparaison modèle-mesures

La comparaison (Figure 83 de l'annexe 8.3) fait apparaître des comportements très différents sur deux périodes : l'une jusque fin 2018 à l'époque où le prélèvement avait lieu à 5 m de la berge et l'autre à partir de fin 2018 après le déplacement du point de prélèvement de la SMP aval à 70 m de la rive gauche (voir chapitre 2.1). Sur la période jusque fin 2018, quelques déficits de détection des rejets de Saint-Laurent-des-Eaux semblent exister et les mesures significatives semblent fréquemment inférieures aux niveaux attendus par la modélisation, ce qui n'est plus le cas après le déplacement du point de prélèvement fin 2018.

A titre d'illustration, un extrait de la figure précitée est reproduit dans la Figure 47 ci-dessous.



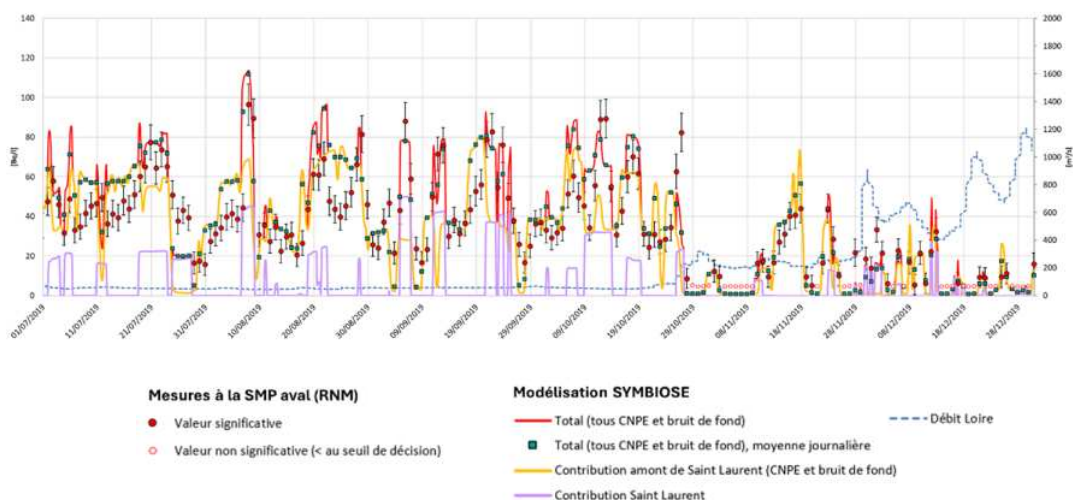


Figure 47 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux, sur le premier semestre 2018 (avant le déplacement du prélèvement) et le second semestre 2019 (après le déplacement du prélèvement)

Détection des rejets du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

La proportion des mesures inférieures au seuil de décision (Figure 48) montre que la SMP aval de Saint-Laurent-des-Eaux ne détectait pas toujours les rejets du CNPE de Saint-Laurent sur la période de janvier 2017 à fin 2018, avec une proportion mensuelle d'absence de détection régulièrement supérieure à 50%. Ces défauts de détection dateraient a priori de la modification de l'ouvrage de rejet en 1996, quand le CNPE est passé d'un rejet effectué en berge gauche à un rejet par une clarinette en milieu de Loire.

Sur la période postérieure au déplacement du point de prélèvement de la SMP aval fin 2018, les rejets de Saint-Laurent-des-Eaux semblent ne pas être détectés qu'à deux occasions (cf. la Figure 83 relative à Saint-Laurent-des-Eaux en annexe 8.3) :

- le 10/01/2020, avec une activité modélisée de 6,4 Bq/L proche du SD de 4,75 Bq/L, sur un épisode de rejet très court et de faible amplitude, de sorte que l'occurrence ne sera pas retenue comme défaut,
- le 24/05/2020, avec une activité modélisée de 9,5 Bq/L pour un SD de 4,44 Bq/L. Ce défaut de détection ne survenant pas lors d'un début ou fin de front, il demeure inexpliqué. S'agissant d'une singularité, elle n'a pas été investiguée davantage.

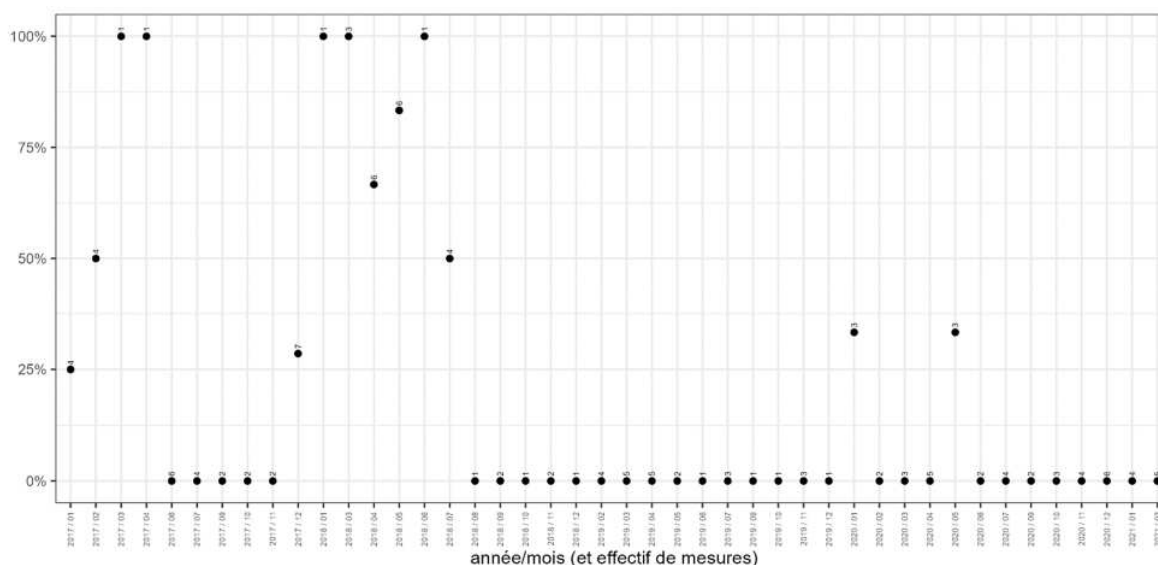


Figure 48 : Pourcentage mensuel de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021

L'analyse en fonction de débits (Figure 49) indique que les défauts de détection concernaient plutôt les débits supérieurs à 300 m³/s, avec des fréquences pouvant atteindre 40%.

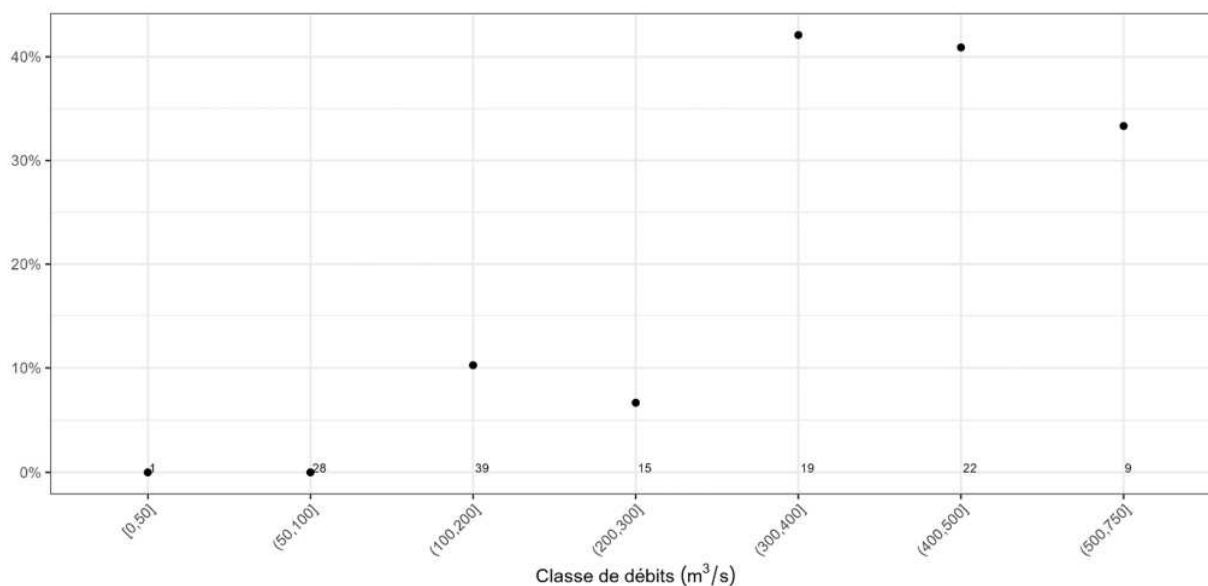


Figure 49 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Il est donc estimé que la SMP aval détecte bien les rejets du CNPE depuis le déplacement de son prélèvement. Avant ce déplacement, des déficits de détection significatifs ont été observés pour les débits compris entre 300 et 750 m³/s.

Représentativité des mesures vis à vis des rejets du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

Du fait du déplacement du point de prélèvement de la SMP aval à la fin 2018, l'analyse du rapport $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ par classe de débits, a été menée sur deux périodes distinctes : la période janvier 2017 – décembre 2018 d'une part et la période janvier 2019 – avril 2021 d'autre part.

Sur la période janvier 2017 – décembre 2018, l'analyse suggère un problème de représentativité des mesures vis-à-vis des rejets du CNPE de Saint Laurent-des-Eaux pour les débits de la Loire supérieurs à 200 m³/s, avec des médianes inférieures à 1. Cependant, l'interprétation des résultats doit être nuancée par le faible nombre de mesures d'intérêt pour chaque classe de débits – c'est-à-dire du faible nombre d'occurrences d'une contribution « principale » des rejets du CNPE de Saint Laurent-des-Eaux devant ceux de Belleville et de Dampierre.

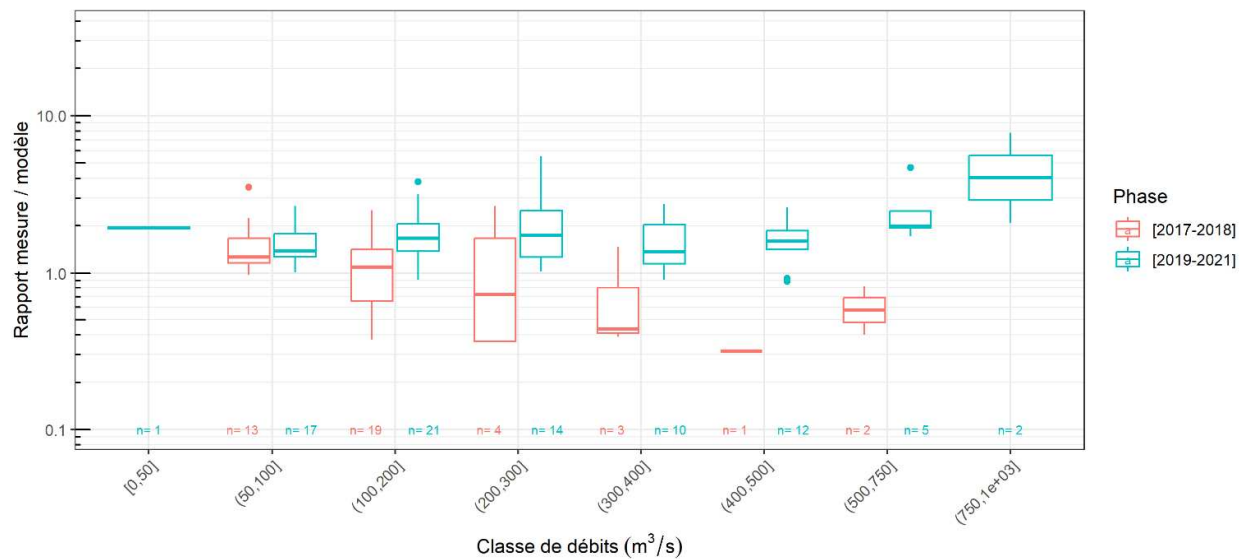


Figure 50 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité attendue

Ces résultats sont en accord avec les études de dilution d'EDF[2][8] qui montrent que le prélèvement de la SMP aval n'est pas réalisé à proximité des activités volumiques maximales de tritium du panache, où les CDL maximaux sont :

- 1,7 à l'étiage, débit proche de 60 m³/s ;
- ~2,4 au débit de 210 m³/s ;
- 2,2 au module, débit proche de 350 m³/s.

Sur la période janvier 2019 – avril 2021, les médianes des rapports $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ sont de 1,4 pour la classe de débits [50 ; 100 m³/s], 1,8 pour la classe [200 ; 300 m³/s] et 1,4 pour la classe [300 ; 400 m³/s].

EDF [8] indique que le prélèvement actuel de la SMP aval est positionné dans la veine de rejet, dans une zone où le CDL attendu est proche de 1. Nos observations suggèrent que le prélèvement actuel se fait effectivement dans la veine de rejet, dans une zone où le mélange des rejets n'est pas homogène et où le rapport $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ est globalement supérieur à 1 et inférieur à 2. Ce rapport semble augmenter pour les débits de Loire supérieurs à 500 m³/s, mais le faible nombre d'observations sur ces débits ne permet pas de l'affirmer de façon certaine.

Détection et représentativité des mesures vis-à-vis des rejets des CNPE en amont du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

La Figure 51 suggère que des défauts de détection des rejets des CNPE situés en amont du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux (CNPE de Belleville-sur-Loire et Dampierre-en-Burly) pourraient se produire pour les débits supérieurs à 400 m³/s. L'analyse de la comparaison modèle-mesures (cf. Figure 83 relative au site de Saint-Laurent-des-Eaux en annexe 8.3) montre qu'il existe une vingtaine d'occurrences de mesures inférieures au SD pour un niveau attendu supérieur à 5 Bq/L, la plupart survenant en début ou fin de front de passage d'un panache de rejet, ce qui traduit vraisemblablement des erreurs de modélisation du temps d'arrivée des panaches, la SMP aval étant très éloignée des émissaires de rejet des CNPE situés en amont. Les occurrences du 14/03/2020 et 19/05/2020 surviennent quand le modèle attend des niveaux inférieurs à 10 Bq/L et sont plus difficiles à expliquer. S'agissant de deux cas isolés, ils n'ont pas été analysés davantage et il est donc estimé que la SMP aval de Saint-Laurent-des-Eaux détecte bien les rejets des CNPE situés en amont.

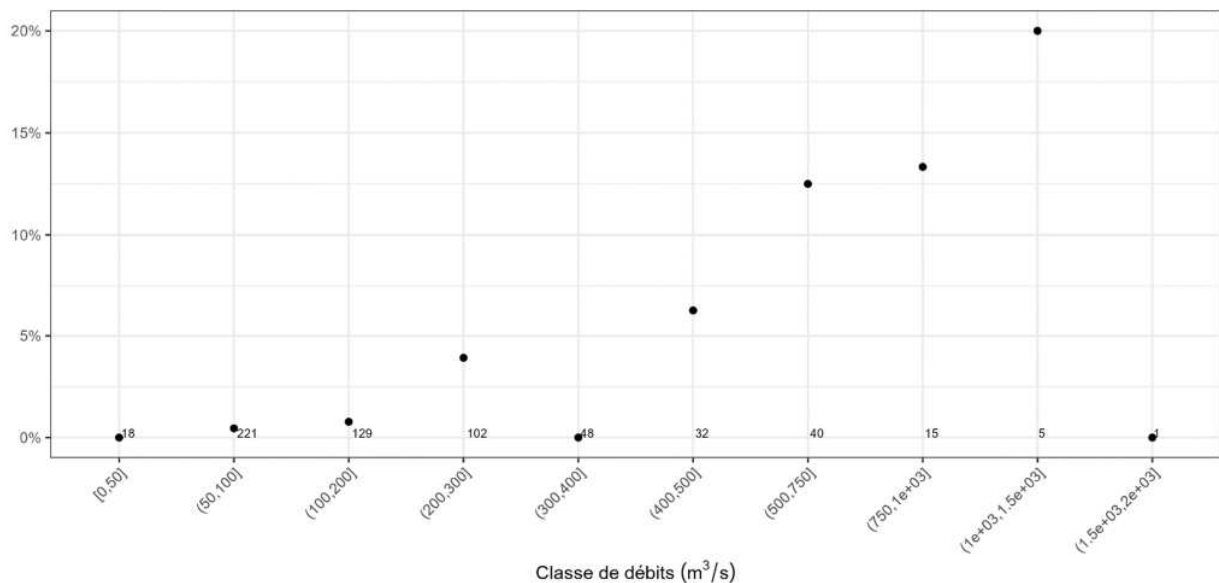


Figure 51 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval de Saint-Laurent-des-Eaux, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont

La Figure 52 montre que le rapport $\frac{\text{mesure} (> \text{SD})}{\text{modèle 1D quotidien}}$ est faible aux bas débits, avec des valeurs médianes bien inférieures à 1 pour les classes de débits inférieures à 300 m³/s. En l'absence d'affluent majeur pouvant diluer les apports des CNPE amont, ce résultat est assez inattendu : la SMP étant située à une distance assez grande du CNPE de Belleville (~142 km) et celui de Dampierre (~104 km), leurs rejets sont vraisemblablement complètement mélangés pour les faibles débits de Loire qui favorisent les mélanges (ceux de Belleville étant déjà complètement mélangés à 12,5 km en aval du CNPE pour le débit d'étiage par exemple).

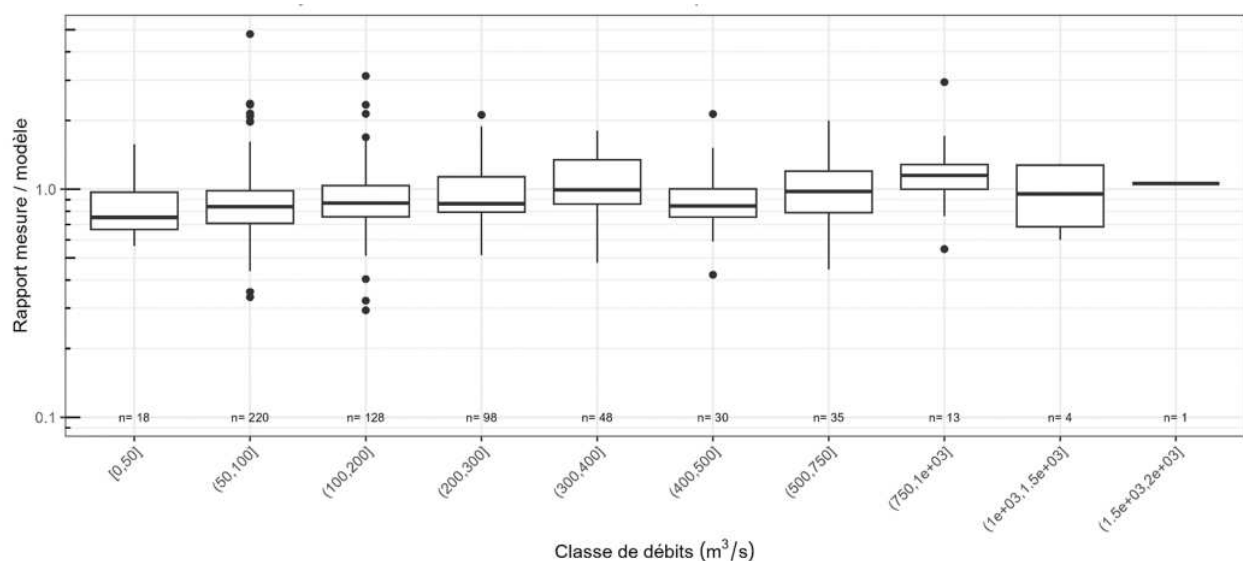


Figure 52 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont

L'explication la plus vraisemblable de la faiblesse du rapport observée aux débits les plus faibles est celle d'une dilution du tritium de la Loire issu des rejets des CNPE amont par des apports d'eau de nappes phréatiques dont la modélisation ne tient pas compte. En effet, les mesures de débit à la station HYDRO⁹ d'Orléans montrent une perte de débit de 15% à plus de 30% entre Gien et Orléans pour les débits < 300 m³/s (Figure 53). Ce débit perdu est entièrement compensé au niveau de Blois, où les débits mesurés sont supérieurs à ceux de Gien : la compensation est vraisemblablement due aux apports de la nappe de la Beauce au nord de la Loire, qui sont avérés en période d'étiage. La non prise en compte des débits à la station HYDRO d'Orléans dans le calage hydraulique (cf. Annexe 8.2) conduit à ne pas intégrer la dilution des rejets de Belleville et Dampierre par les apports de la nappe de la Beauce après Orléans, et pourrait donc expliquer que le rapport $\frac{\text{mesure (> SD)}}{\text{modèle 1D quotidien}}$ soit inférieur à 1 aux faibles débits en l'absence de rejets du CNPE de Saint-Laurent.

⁹ 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 des stations sur les cours d'eau français, sur la base de mesures de hauteurs d'eau et de courbes de tarage. Ces données sont directement accessibles sur le site : www.hydro.eaufrance.fr.

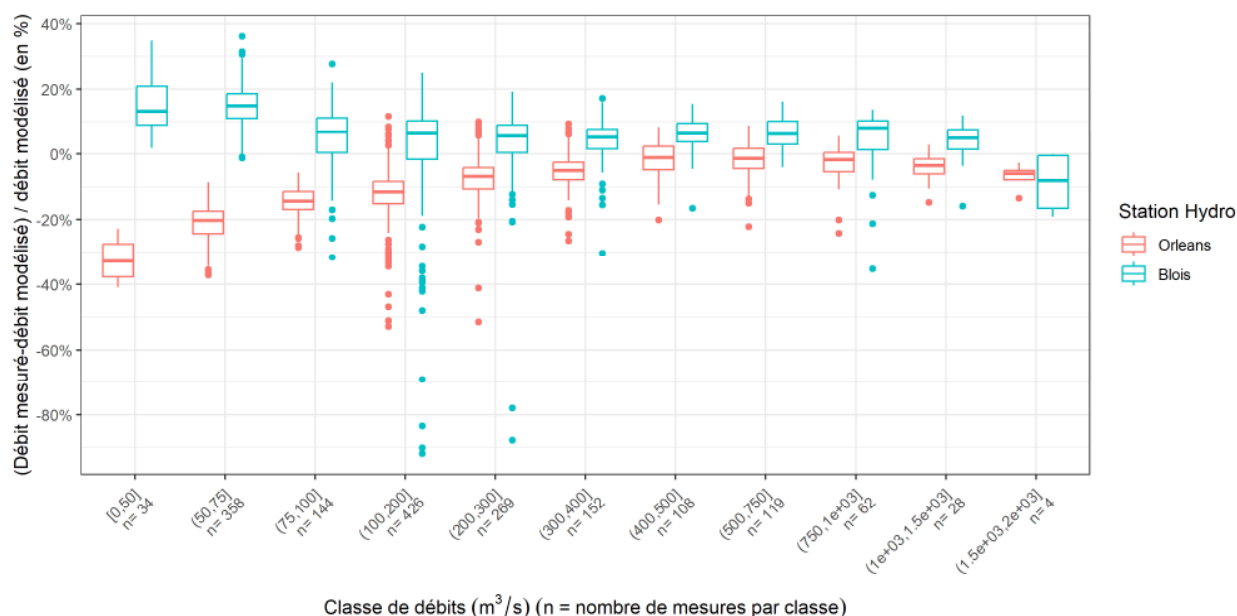


Figure 53 : Ecart relatif entre le débit mesuré et le débit attendu par le modèle 1D aux stations HYDRO d'Orléans et de Blois à partir des débits mesurés à la station HYDRO de Gien, par classe de débits, sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Modélisation du profil latéral des activités volumiques

La Figure 54 ci-après, présente l'évolution de la distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux en fonction du débit.

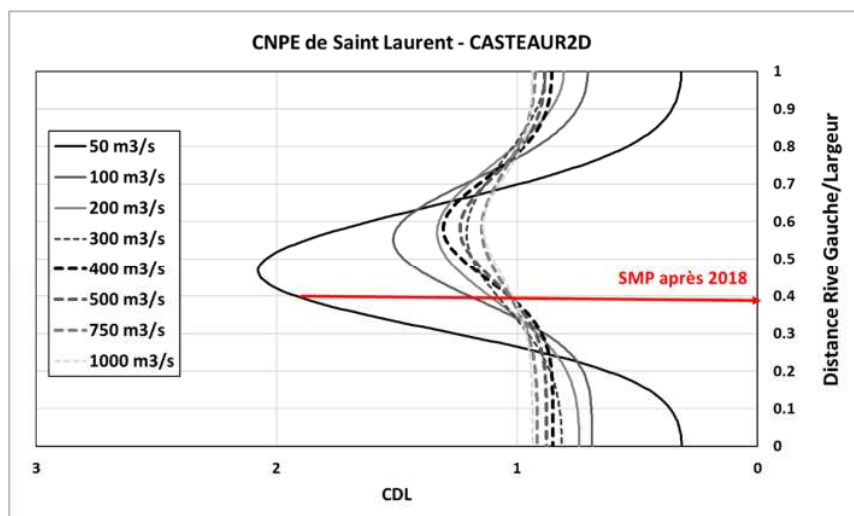


Figure 54 : Distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux

Quel que soit le débit de la Loire, les conditions de mélange homogène ne sont pas atteintes au niveau de la SMP aval. Le positionnement de l'axe du panache au centre de la veine explique les limitations de cette station lorsque le prélèvement était réalisé près de la berge gauche et justifie son déplacement à près de 70 m de cette berge, où les CDL sont proches de 1 à tous les régimes de débit.

La Figure 55 présente la comparaison des CDL modélisés au nouveau point de prélèvement de la SMP aval à ceux déduits du modèle 1D à la suite du déplacement du point de prélèvement de la SMP aval fin 2018.

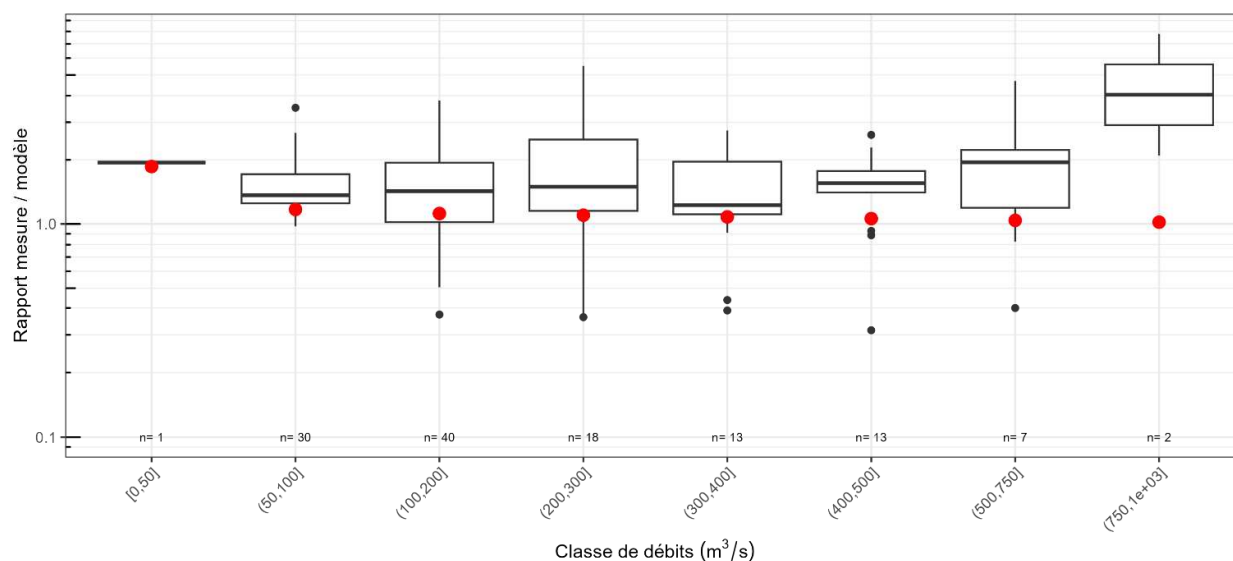


Figure 55 : CDL à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux (modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D) à la suite du déplacement du point de prélèvement fin 2018

Les deux approches donnent des tendances cohérentes jusqu'à des débits de 400 m³/s. Au-delà, les CDL donnés par le modèle 2D sont inférieurs à ceux de l'analyse 1D, ce qui peut traduire un défaut de calibration du modèle 2D pour les conditions de forts débits qui ne sont pas renseignées par des traçages liquides.

Bien que les conditions de mélange homogène ne soient jamais atteintes à la SMP aval, cette dernière peut être considérée représentative des rejets du CNPE depuis que le point de prélèvement a été déplacé vers le centre de la veine d'eau. Néanmoins, les études de dilution EDF et la modélisation 2D montrent que ce point est situé dans une zone de forte variation transversale des CDL. La représentativité du prélèvement paraît donc sensible à toute modification de l'écoulement qui décalerait légèrement le panache, ce qui invite à régulièrement contrôler la représentativité de cette SMP aval.

Synthèse

Le prélèvement de la SMP aval a été déplacé fin 2018, passant de quelques mètres à environ 70 m de la rive gauche. Avant le déplacement, les comparaisons modèle-mesures montrent un problème de détection des rejets et de représentativité de la SMP. Ces observations sont caractéristiques d'un prélèvement effectué en bord du panache. Ces difficultés dateraient a priori de la modification de l'ouvrage de rejet en 1996, quand le CNPE est passé d'un rejet effectué en berge gauche à un rejet par une clarinette en milieu de Loire.

Après le déplacement du prélèvement fin 2018, les comparaisons modèle-mesures montrent que la SMP aval détecte les rejets et qu'elle en est représentative avec un rapport $\frac{\text{mesure (> SD)}}{\text{modèle 1D quotidien}}$ globalement compris entre 1 et 2, pour tous les débits. Ces observations sont cohérentes avec les études de dilution d'EDF et confortent que le prélèvement est positionné dans la veine de rejet mais pas au maximum atteint sur la section.

Néanmoins, le prélèvement est situé dans une zone de forte variation transversale des CDL, qui rend sa représentativité sensible à toute modification de l'écoulement qui décalerait légèrement le panache.

4.4 CHINON

— Comparaison modèle-mesures

La comparaison entre les activités volumiques de tritium mesurées dans les échantillons fournis par la SMP située en aval de Chinon (Figure 84 de l'annexe 8.3) et celles calculées par modélisation, montre que ces échantillons permettent globalement de bien suivre le passage des panaches des rejets des CNPE situés en amont de Chinon même si le niveau modélisé semble parfois supérieur aux mesures. En revanche, les échantillons prélevés par la SMP semblent très peu représentatifs vis-à-vis des rejets du CNPE de Chinon pour les débits de la Loire supérieures à 100 m³/s, qu'elle peut ne pas détecter. Pour les débits inférieurs à 100 m³/s, les échantillons prélevés semblent représentatifs des rejets du CNPE de Chinon, avec des mesures supérieures au niveau attendu par la modélisation, indiquant que le prélèvement se fait bien dans la veine du rejet.

A titre d'illustration, un extrait de la figure précitée est reproduit dans la Figure 56 ci-après.

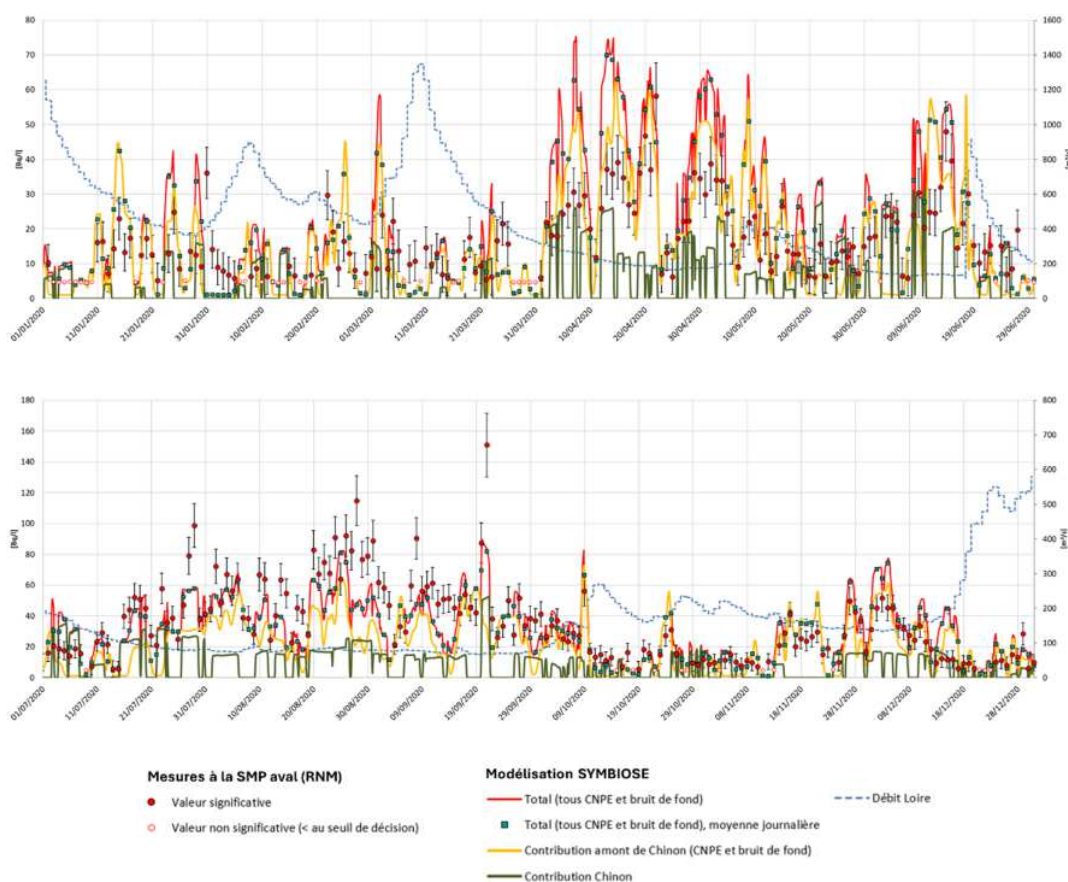


Figure 56 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en ³H à la SMP aval du CNPE de Chinon, sur l'année 2020

— Détection des rejets du CNPE de Chinon

La proportion des mesures inférieures au SD montre que la SMP aval de Chinon ne détecte pas toujours les rejets du CNPE de Chinon, avec une proportion mensuelle d'absence de détection régulièrement supérieure à 50% (Figure 57). Elle détecte bien les rejets uniquement pour les débits inférieurs à 200 m³/s (Figure 58).

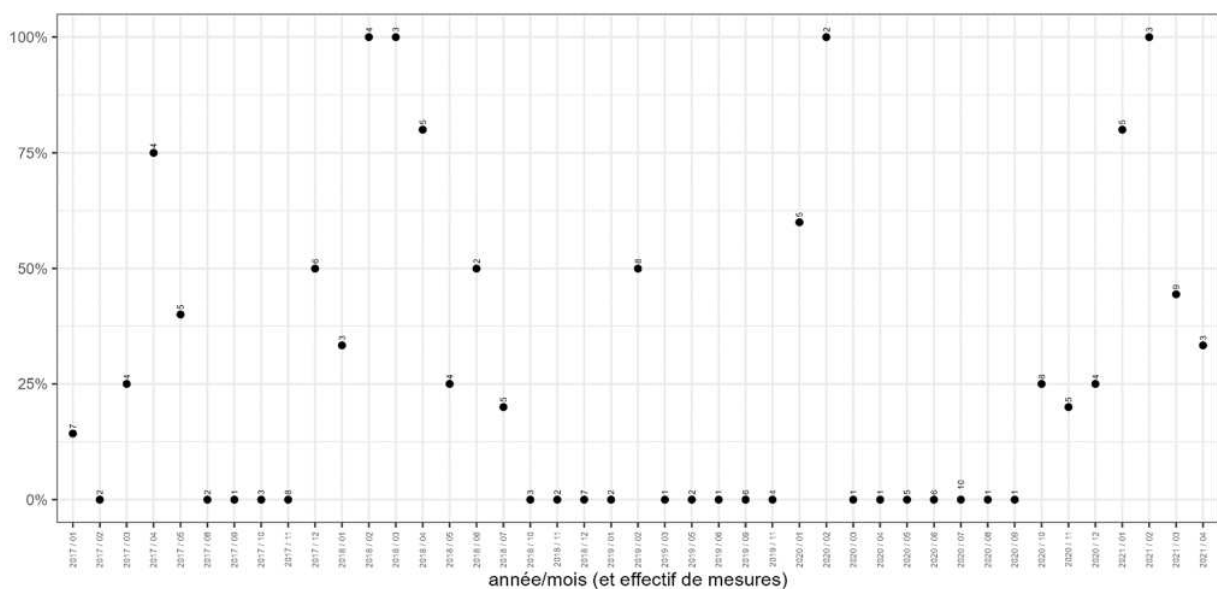


Figure 57 : Pourcentages mensuels de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Chinon quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021

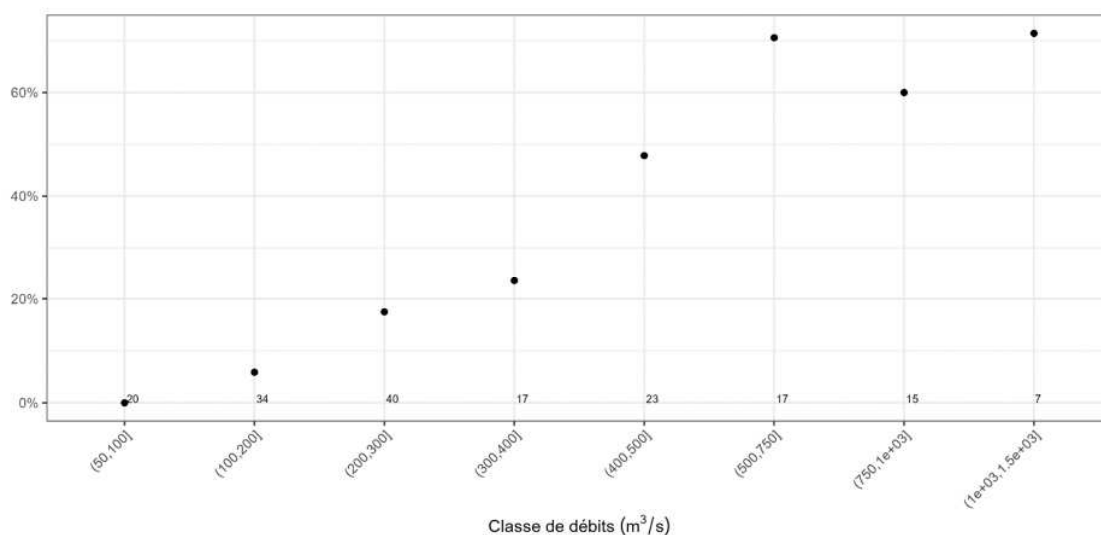


Figure 58 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Chinon quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Représentativité des mesures vis à vis des rejets du CNPE de Chinon

Le rapport $\frac{\text{mesure}(>SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$, est supérieur à 1 pour les débits inférieurs à 100 m³/s et inférieurs à 1 entre 100 et 500 m³/s. Pour les débits supérieurs à 500 m³/s, le rapport est variable, compris entre 1 et 2 (la médiane du rapport est supérieure à 1 pour les classes de débits [500 m³/s, 750 m³/s] et [1000 m³/s, 1500 m³/s], mais légèrement inférieure à 1 pour la classe [750 m³/s, 1500 m³/s]). Le nombre d'occurrences est toutefois faible dans ces classes de débits et une certaine prudence statistique est de rigueur.

Les tendances observées sur la période d'étude rejoignent celles de l'étude du tritium au pont Cessart à Saumur [1] d'une part et celles des études de dilution d'EDF [9] d'autre part. Elles montrent que le point de prélèvement est en limite de veine de rejet pour les débits proches du module (377 m³/s pour la campagne de 2019, 346 m³/s pour la campagne de 2020) ainsi que pour les débits supérieurs à 100 m³/s (123 m³/s pour la campagne de 2021 [8]). Pour le débit d'étiage de 95 m³/s de la campagne de 2017 le point de prélèvement est bien situé dans la veine (CDL légèrement supérieur à 1).

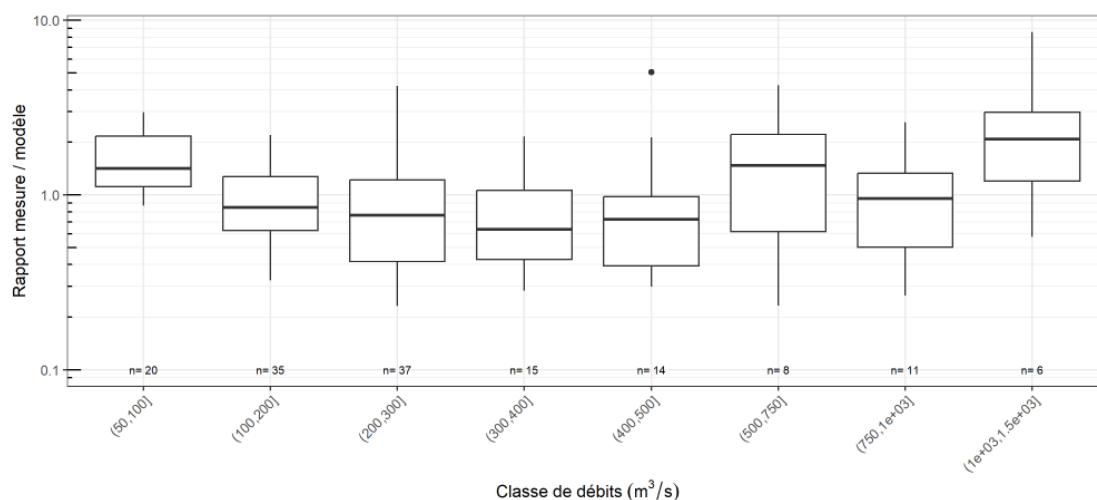


Figure 59 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Chinon, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, quand le CNPE en est le principal contributeur

Détection et représentativité des mesures vis à vis des rejets des CNPE en amont du CNPE de Chinon

La Figure 60 suggère que des défauts de détection des rejets des CNPE situés en amont du CNPE de Chinon (CNPE de Belleville-sur-Loire, Dampierre-en-Burly et Saint-Laurent-des-Eaux,) pourraient se produire pour les débits supérieurs à 200 m³/s. L'analyse de la comparaison modèle-mesures (cf. Figure 84 relative au site de Chinon en annexe 8.3) montre qu'il existe une trentaine d'occurrences de mesures inférieures au SD pour un niveau attendu supérieur à 5 Bq/L. Toutefois, pour la plupart, soit l'activité modélisée est inférieure au SD de la mesure et donc ne traduit pas de déficit de détection, soit l'occurrence survient en début ou fin de front de passage d'un panache de rejet, ce qui traduit vraisemblablement des erreurs de modélisation du temps d'arrivée des panaches, la SMP aval étant très éloignée des émissaires de rejet des CNPE amont. Les occurrences du 08/03/2018, du 29/03/2020, du 12/01/2021 (quand le modèle attend des niveaux inférieurs à 10 Bq/L) et du 25/02/2019 (quand le modèle attend une activité volumique de 13 Bq/L) sont plus difficiles à expliquer. S'agissant d'un faible nombre d'occurrences, ces cas n'ont pas été analysés davantage et il est estimé que la SMP aval de Chinon permet globalement bien la détection des rejets des CNPE situés en amont.

Le rapport $\frac{\text{mesure}(>SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ est souvent inférieur à 1 jusqu'à 750 m³/s (Figure 61). Au-delà, il semble s'approcher de 1, voire être supérieur à 1 aux débits supérieurs à 1500 m³/s, mais cette tendance reste incertaine en raison du nombre trop faible de mesures (4 mesures). La faiblesse du rapport $\frac{\text{mesure}(>SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ pourrait être attribuée à des erreurs de modélisation du temps d'arrivée des panaches, la SMP aval étant très éloignée des émissaires de rejet des CNPE amont, mais la comparaison modèle-mesures n'étaye pas cette hypothèse, le suivi des passages de ces rejets semblant globalement correct (Figure 84).

Il est probable que la dilution supplémentaire qui résulte de l'augmentation du débit de la Loire en raison des apports des nappes dans l'Orléanais, discuté dans le paragraphe dédié à la SMP aval de Saint Laurent-des-Eaux, ne suffit pas à expliquer non plus cette faible représentativité jusqu'aux débits de 750 m³/s, puisque cette dilution était marquante essentiellement pour les faibles débits de Loire.

L'explication privilégiée est celle d'une dilution supplémentaire des rejets amont, survenant en aval de Saint Laurent et qui pourrait être liée aux apports de l'Indre et surtout du Cher, affluents de la rive gauche de la Loire, du même côté que la SMP aval. Il est bien tenu compte de ces affluents dans la modélisation, mais le calcul 1D suppose que la dilution s'effectue de

façon homogène sur toute la largeur du cours d'eau et pourrait donc sous-estimer la dilution en rive gauche du côté des confluences (et la surestimer ailleurs). Des mesures effectuées en amont du CNPE de Chinon en janvier 2021 dans le cadre de l'étude du tritium au pont Cessart à Saumur [1] avaient effectivement montré des activités volumiques de tritium deux fois plus élevées en rive droite qu'en rive gauche, en cohérence avec une veine d'eau en rive gauche sous influence du Cher, dont les eaux sont a priori au niveau du bruit de fond en tritium.

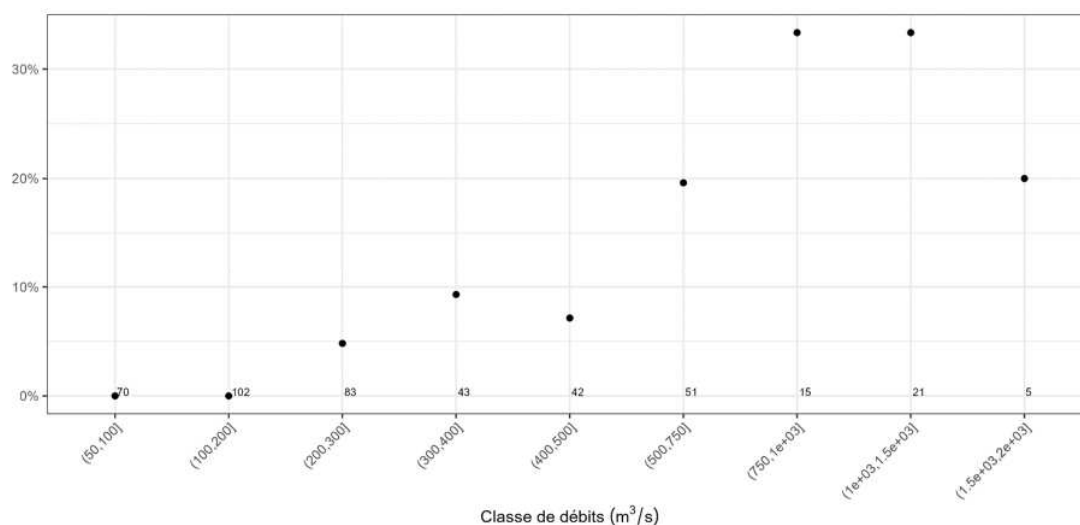


Figure 60 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Chinon, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont

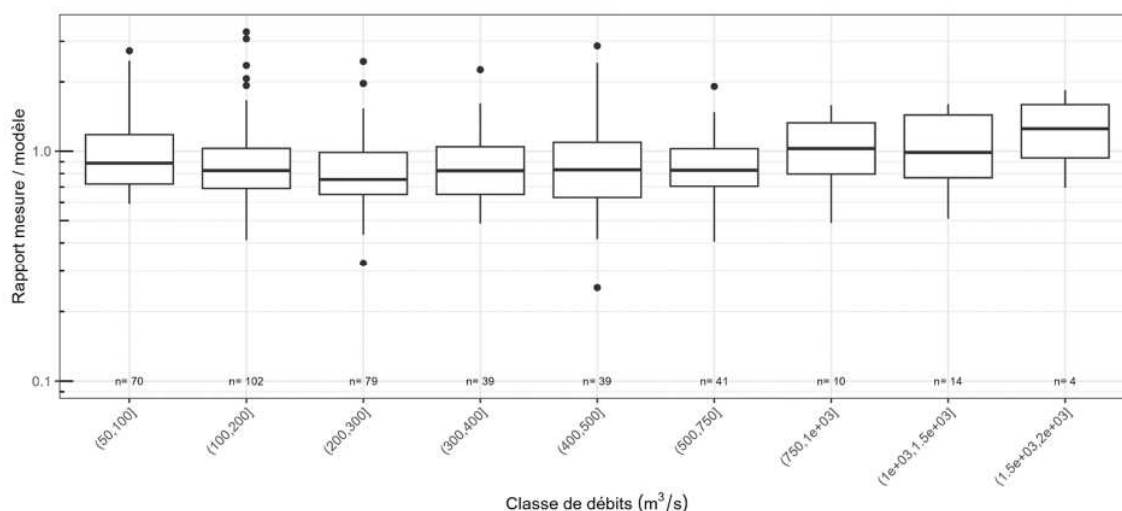


Figure 61 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Chinon, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont

Modélisation du profil latéral des activités volumiques

La SMP aval du CNPE de Chinon se situe en berge gauche du chenal gauche de la Loire. Les répartitions transversales des CDL modélisés dans les deux bras de la Loire au droit de la SMP aval sont présentées sur la Figure 62.

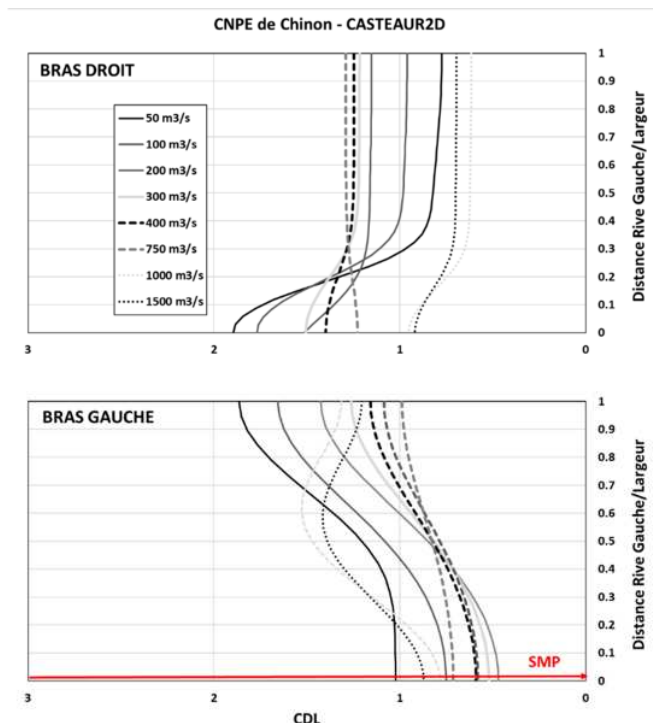


Figure 62 : Distribution transversale des CDL modélisés dans les deux bras de la Loire au droit de la SMP aval du CNPE de Chinon

Au niveau de la SMP aval, les panaches se répartissent entre les deux bras entourant l'île centrale. A faible débit, le pic est centré et à cheval sur ces deux bras et les CDL au niveau de la SMP sont proches de 1. Lorsque le débit de la Loire augmente jusqu'à 500 m³/s, le pic se décale vers le bras droit de l'île et les CDL diminuent à la SMP. Le code CASTEAUR2D n'a pas été calibré pour des débits plus forts mais des simulations exploratoires suggèrent que, dans ces situations, les pics se recentrent vers le bras gauche avec une augmentation des CDL à la SMP en accord avec les résultats de l'analyse 1D.

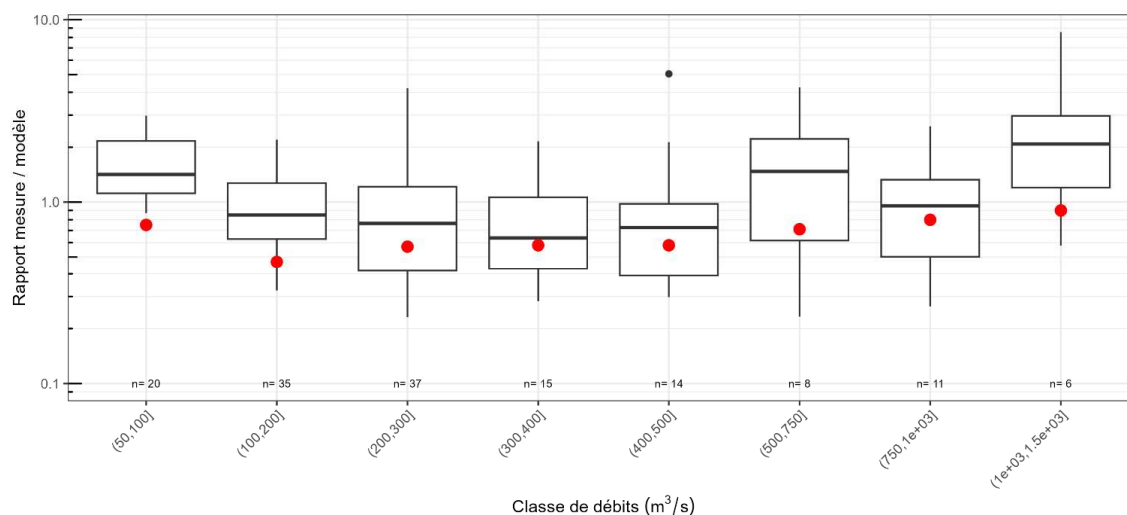


Figure 63 : CDL à la SMP aval du CNPE de Chinon : modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D

Malgré des différences entre les approches 1D et 2D, les tendances générales sont cohérentes avec des CDL inférieurs à 1 sur une large gamme de débit, qui augmentent pour les débits les plus forts. Ces résultats sont concordants avec les observations de l'étude IRSN [1] et confirment la faible représentativité de la SMP aval du CNPE de Chinon pour des débits de Loire supérieurs à 100 m³/s.

Synthèse

Pour la SMP aval du CNPE de Chinon, les résultats de cette étude sont cohérents avec ceux de l'étude des activités volumiques de tritium des eaux de la Loire prélevées au pont Cessart à Saumur [1]. Il apparaît un déficit de détection des rejets du CNPE pour les débits supérieurs à 200 m³/s. En présence de ses rejets, les rapports $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ sont :

- supérieurs à 1 pour les débits inférieurs à 100 m³/s, signe que le prélèvement se fait dans la veine de rejet en zone de mélange incomplet,
- inférieurs à 1 pour les débits compris entre 100 et 500 m³/s. La SMP présente donc une faible représentativité sur cette gamme de débits,
- apparemment plus élevés pour les débits supérieurs à 500 m³/s, mais les mesures sont trop variables et insuffisamment nombreuses pour conclure sur la représentativité de la SMP pour cette gamme de débit.

Les difficultés de détection et de représentativité datent *a priori* de la modification de l'ouvrage de rejet en 1999, quand le CNPE est passé d'un rejet effectué en berge gauche à un rejet s'effectuant le plus souvent par une clarinette en Loire.

4.5 CIVAUX

Comparaison modèle-mesures

Le bon accord global constaté entre les activités volumiques de tritium mesurées dans les échantillons fournis par la SMP située en aval de Civaux (Figure 85 de l'annexe 8.3) et celles calculées par modélisation, montre que le positionnement de la station permet le suivi temporel des fronts des panaches des rejets. Notamment, les mesures et les moyennes estimées par le modèle sont très proches pour tous les débits de la Vienne. Ceci indique que la SMP aval détecte toujours les rejets du CNPE et que les mesures sont représentatives des niveaux moyens attendus, quel que soit le débit.

A titre d'illustration, un extrait de la figure précitée est reproduit dans la Figure 64 ci-après.

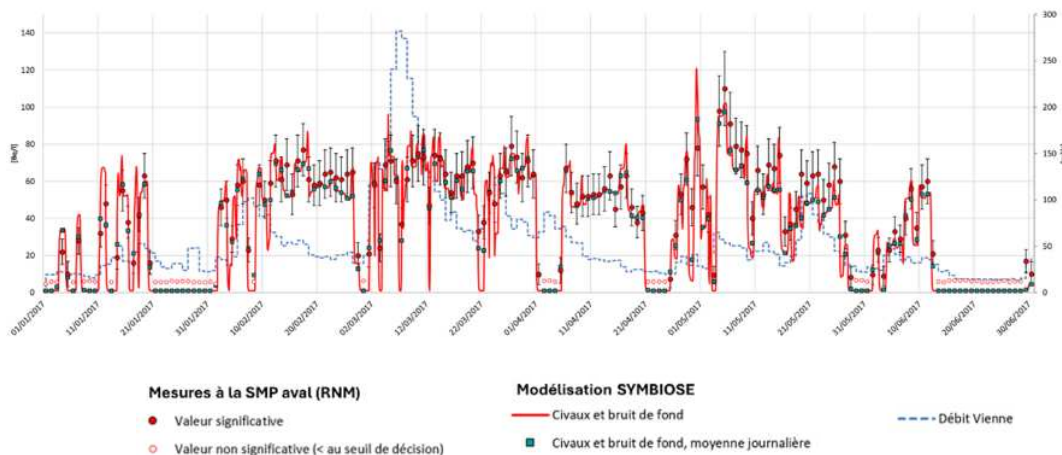


Figure 64 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE de Civaux, sur le premier semestre 2017

Détection des rejets du CNPE de Civaux

La proportion des mesures inférieures au seuil de décision (Figure 65) montre que la SMP aval de Civaux détecte quasi systématiquement les rejets du CNPE de Civaux, avec seulement 9 occurrences de mesures inférieures au seuil de décision pour un niveau attendu supérieur à 5 Bq/L.

Sur ces 9 occurrences, la comparaison modèle-mesures (cf. la Figure 85 relative au site de Civaux en annexe 8.3) montre que 7 surviennent en début ou fin de front de passage d'un panache de rejet, avec des écarts assez faibles et une activité volumique prédite par le modèle toujours inférieure à 10 Bq/L (les 08/02/2017, 15/09/2017, 13/03/2020, 24/06/2020, 19/10/2020, 11/03/2021 et 16/04/2021) ; ces écarts sont sans doute dus à un biais de modélisation.

Une occurrence est vraisemblablement liée à une erreur de remontée dans le RNM : le 28/05/2020 (en tenant compte du décalage d'un jour lié au système de déclaration de date d'EDF à cette époque), deux mesures journalières sont rapportées, l'une significative de 27,4 Bq/L, l'autre inférieure au seuil de décision de 4,6 Bq/L, quand le modèle prédit 23,45 Bq/L. En revanche, le 29/05/2020, le RNM ne propose pas de mesure journalière et le modèle prédit une activité de l'ordre de 1 Bq/L. La mesure < SD du 28/05/2020 est probablement la mesure manquante du prélèvement le 29/05/2020.

Enfin, l'occurrence du 25/03/2018 n'est pas explicable : le modèle attend une activité de 34,45 Bq/L quand la mesure est inférieure au seuil de décision de 5,8 Bq/L, un jour avant la fin du front de rejet en cours. S'agissant d'une singularité unique sur la période d'étude, elle n'a pas été analysée davantage.

L'analyse par classe de débits (Figure 66) ne permet pas de dégager de tendance préférentielle en fonction du débit pour les occurrences des mesures inférieures au SD, les pourcentages d'occurrence étant très faibles.

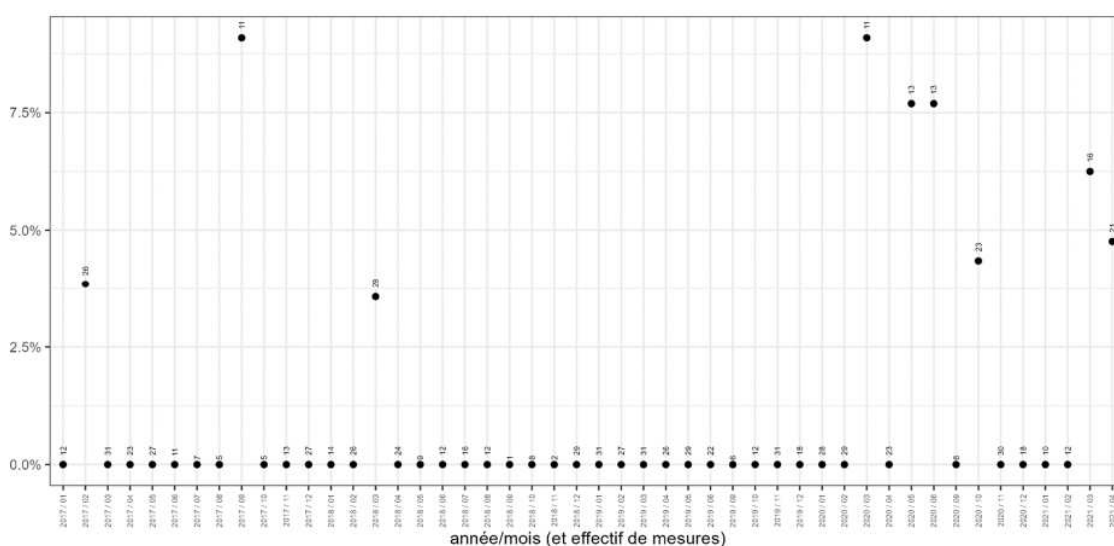


Figure 65 : Pourcentages mensuels des mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Civaux pendant les rejets du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021

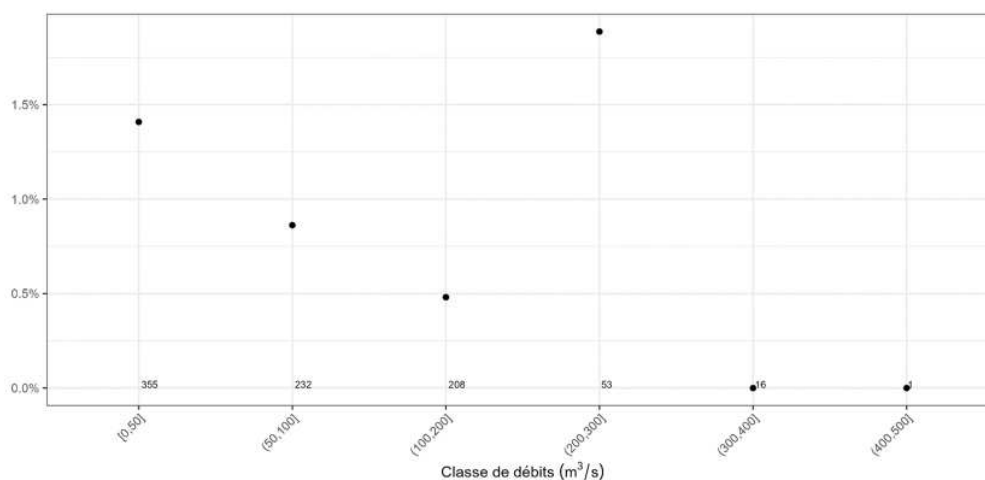


Figure 66 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Civaux pendant les rejets du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Représentativité des mesures vis à vis des rejets du CNPE de Civaux

Les rapports $\frac{\text{mesure } (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ par classe de débits indiquent que la SMP située en aval du CNPE de Civaux fournit des échantillons représentatifs des rejets, avec des rapports très proches de 1 pour toutes les classes de débits et une variabilité très faible au niveau des interquartiles (Figure 67). Ceci est cohérent avec un prélèvement au niveau de la zone de mélange complet des rejets.

Aux très faibles débits, quelques activités volumiques de tritium mesurées sont très supérieures à celles obtenues par modélisation (hors des boîtes à moustaches). Il pourrait s'agir d'un problème de phasage de la modélisation des vitesses de transfert aux plus faibles débits, mais on s'attendrait alors à une variabilité plus forte du rapport (écart interquartile plus grand). Une autre hypothèse pourrait être la présence d'une inhomogénéité latérale réelle, avec des activités plus fortes en rive gauche, due à des rejets émis par la conduite courte côté rive gauche au lieu de la conduite répartissant le rejet sur toute la largeur de la Vienne.

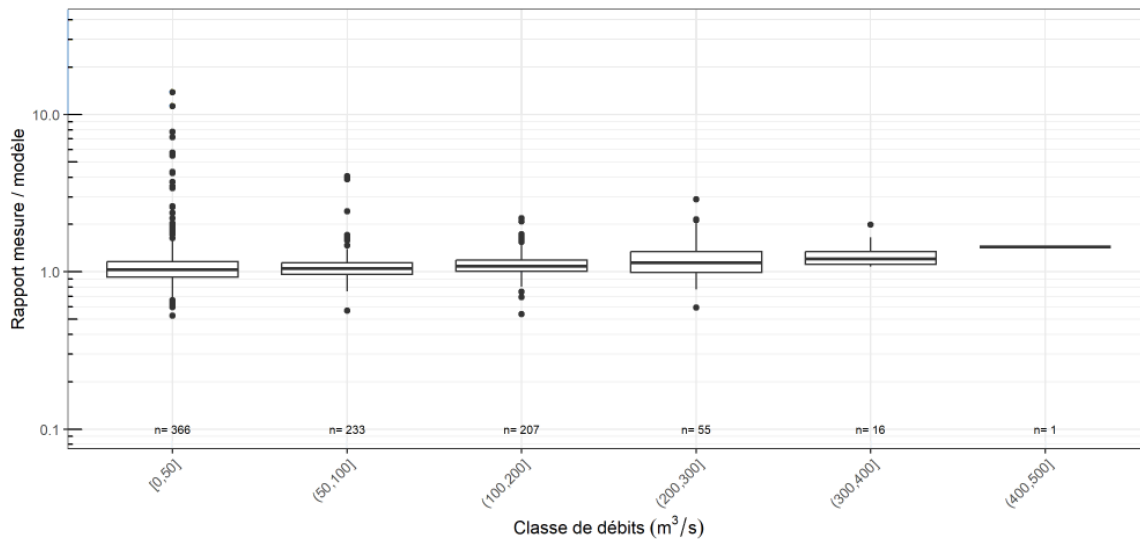


Figure 67 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Civaux par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, pendant les rejets du CNPE

Les différentes campagnes de traçage réalisées par EDF indiquent que la SMP est située à une distance où le mélange des rejets liquides dans la Vienne est homogène quel que soit le débit du cours d'eau.

Les rapports $\frac{\text{mesure } (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ observés entre janvier 2017 et avril 2021 confirment ce positionnement en zone de mélange complet des rejets.

Modélisation du profil latéral des activités volumiques

La Figure 68 présente l'évolution de la distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Civaux pour des rejets effectués à partir de la grande clarinette en fonction du débit.

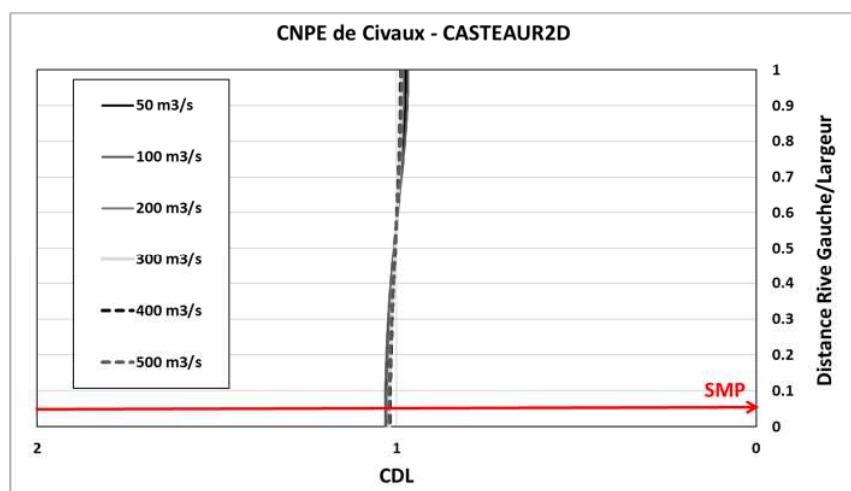


Figure 68 : Distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Civaux

Les profils transversaux des CDL au droit de la SMP aval sont tous uniformes avec des CDL proches de 1. Ces résultats corroborent l'analyse 1D et confirment que les conditions de mélange homogène des rejets du CNPE de Civaux sont vérifiées au niveau de sa SMP aval (Figure 69) pour les débits de la Vienne investigués.

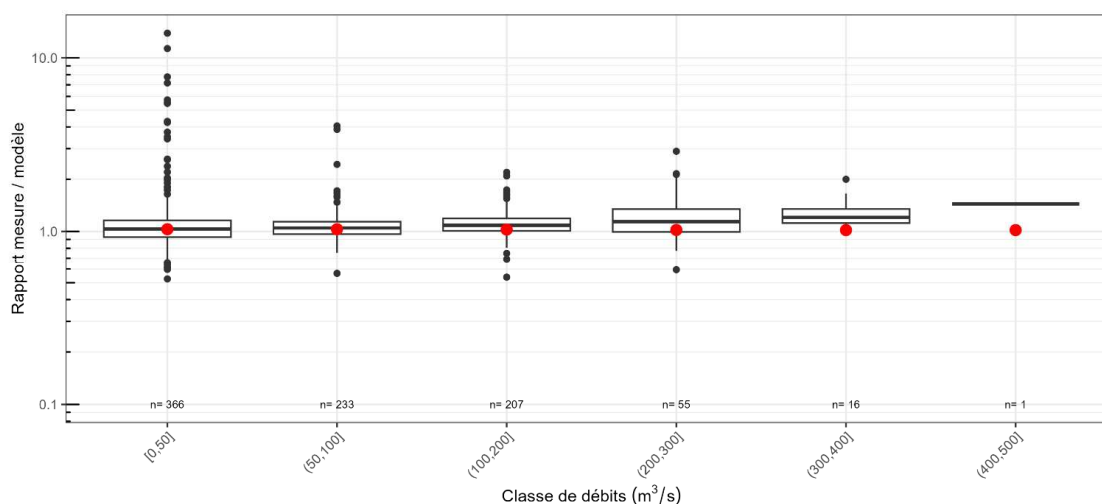


Figure 69 : CDL à la SMP aval du CNPE de Civaux (modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D)

Ainsi, pour des rejets réalisés à partir de la grande clarinette, les prélèvements effectués à la SMP aval sont bien représentatifs des rejets du CNPE.

Synthèse

Sur la période étudiée et quel que soit le débit de la Vienne, la SMP aval de Civaux détecte bien les rejets du CNPE et fournit des échantillons dont les activités volumiques sont proches de l'activité moyenne attendue après mélange complet, ce qui est cohérent avec les études de dilution conduites par le CEA pour EDF pour les débits d'étiage et les débits au module de la Vienne.

SYNTHESE POUR L'ENSEMBLE DES CNPE

La comparaison entre les activités volumiques de tritium mesurées par EDF sur des échantillons prélevés au niveau des SMP situés en aval des CNPE et celles obtenus au moyen d'un modèle 1D est présentée ici en juxtaposant les différents CNPE pour mettre en perspective et synthétiser les résultats des analyses de chaque site.

La Figure 70 ci-dessous présente, pour les 5 sites et pour chaque mois de la période d'étude, la proportion des mesures inférieures au SD, lorsque l'activité volumique attendue par la modélisation est supérieure à 5 Bq/L et que le CNPE surveillé est le « principal » contributeur à cette activité (contribution de ses rejets supérieure à deux fois celle des éventuels rejets des CNPE amont). La comparaison montre que les SMP aval de Belleville et Civaux détectent systématiquement les rejets de leur CNPE et que des problèmes de détection apparaissent pour les trois autres CNPE :

- parfois pour Dampierre-en-Burly, essentiellement début 2017 ;
- régulièrement pour Saint-Laurent-des-Eaux, notamment en 2017 et 2018 (avant le déplacement du point de prélèvement de la SMP) ;
- très souvent pour Chinon sur toute la période d'étude.

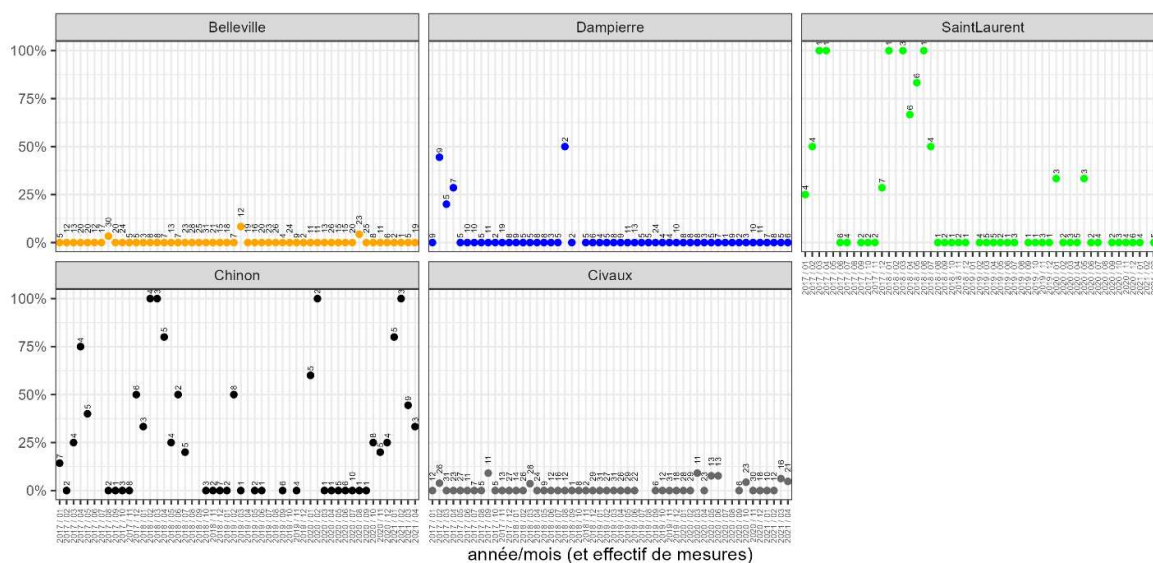


Figure 70 : Pourcentage mensuel de mesures inférieures au seuil de décision par SMP aval, quand le CNPE surveillé est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021

La Figure 71 ci-après présente le même indicateur par classe de débits sur la période d'étude de janvier 2017 à avril 2021. Il apparaît que les défauts de détection des rejets surviennent pour des débits supérieurs au module (débit moyen annuel) pour la SMP aval du CNPE de Saint Laurent (environ 300 m³/s), et pour des débits supérieurs à 200 m³/s pour la SMP aval du CNPE de Chinon.

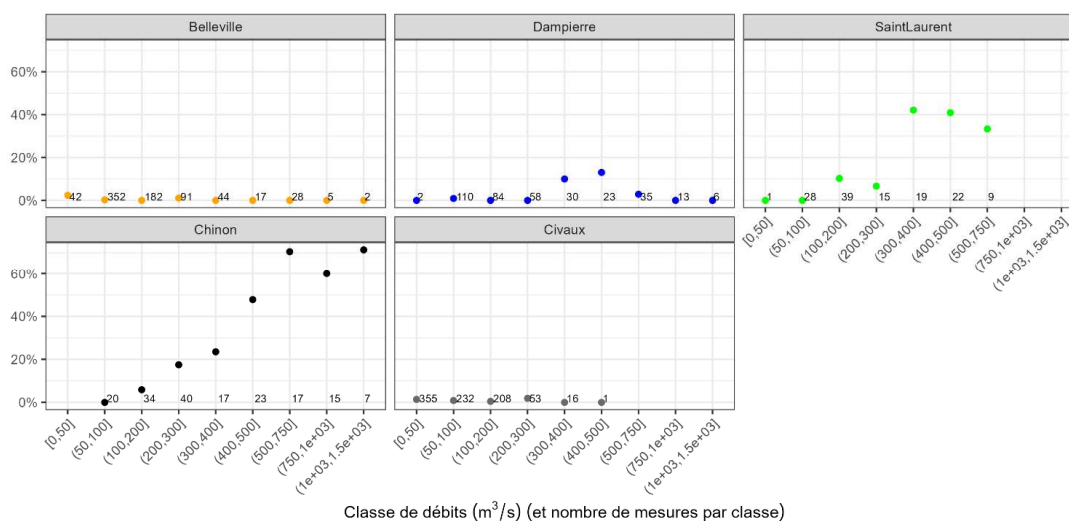


Figure 71 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision par SMP aval, quand le CNPE surveillé est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021

La Figure 72 ci-dessous présente les distributions cumulées du rapport $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ de chaque CNPE, lorsqu'ils rejettent et qu'ils sont les « principaux » contributeurs à l'activité volumique attendue à leur SMP aval. Ces distributions permettent de voir la gamme de variation de ce rapport à tous les régimes hydrauliques et sur toute la période d'étude¹⁰.

La distribution très étalée pour la SMP aval de Chinon, avec plus de 60 % des rapports inférieurs à 1 et presque 25 % inférieurs à 0,5, témoigne des problèmes de représentativité de cette station. Pour les autres SMP aval, les rapports sont le plus souvent proches ou supérieurs à 1. Ils sont globalement compris entre 1 et 2 pour Belleville, entre 1 et 5 pour Dampierre, entre 1 et 3 pour Saint Laurent des Eaux et ils sont cohérents avec des prélèvements dans le panache des rejets mais dans des zones de mélange généralement incomplet.

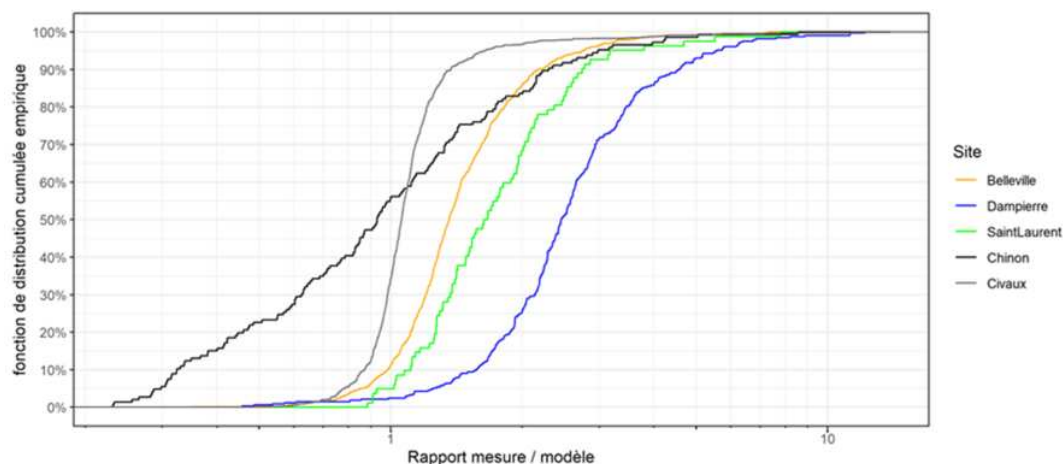


Figure 72 : Distribution cumulée du rapport $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ par SMP aval au cours d'un rejet quand le CNPE surveillé est le principal contributeur à cette activité, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021 (hormis la période jusque fin 2018 pour Saint-Laurent, et la période de février à novembre 2017 pour Dampierre)

¹⁰ Pour Dampierre, la période particulière entre février et novembre 2017 a été exclue ; ainsi que la période 2017- fin 2018 pour Saint Laurent-des-Eaux, qui correspond à la période avant modification du point de prélèvement de la SMP aval.

La Figure 73, ci-dessous, présente les rapports $\frac{\text{mesure} (> SD)}{\text{modèle 1D quotidien}}$ par classe de débits lorsque les CNPE rejettent et qu'ils sont les principaux contributeurs aux activités volumiques attendues à leur SMP aval de janvier 2017 à avril 2021. Ces rapports permettent d'apprécier la représentativité du point de prélèvement de chaque SMP aval vis-à-vis des rejets de son CNPE selon le régime hydraulique du cours d'eau.

Ces rapports sont cohérents avec les coefficients de dilution maximaux rapportés dans les études de dilution EDF et ils mettent en perspective, sur une plus large gamme de débits, les coefficients de dilution acquis par ces études de dilution le plus souvent limitées à un débit d'étiage et un débit proche du module (débit moyen du cours d'eau) du cours d'eau.

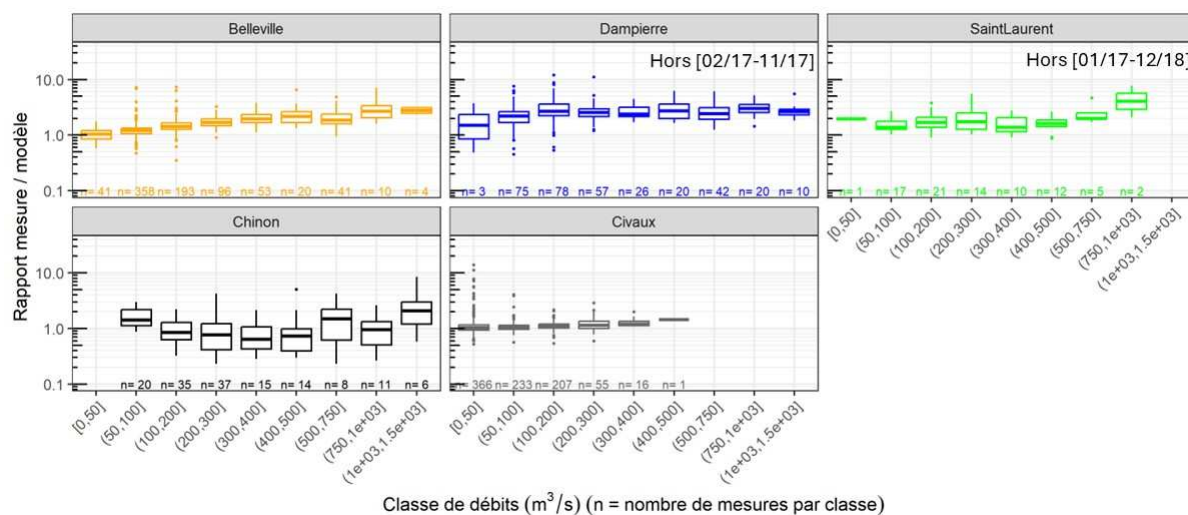


Figure 73 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D, par classe de débits et par SMP aval, quand le CNPE surveillé est le principal contributeur à l'activité attendue, sur la période de janvier 2017 à avril 2021 (hormis la période jusque fin 2018 pour Saint-Laurent, et la période de février à novembre 2017 pour Dampierre)

Sur la période d'intérêt et avec des rapports médians supérieurs à 1, la représentativité des SMP aval est satisfaisante pour les CNPE de Belleville-sur-Loire, Dampierre-en-Burly, Saint-Laurent-des-Eaux et Civaux. En l'état, la SMP aval du CNPE de Chinon présente des défauts de représentativité pour une large gamme de débits de la Loire.

La Figure 74 regroupe les distributions transversales des coefficients de dilution liquide modélisées avec le code CASTEAUR2D au droit des SMP aval des CNPE et en fonction des classes de débit.

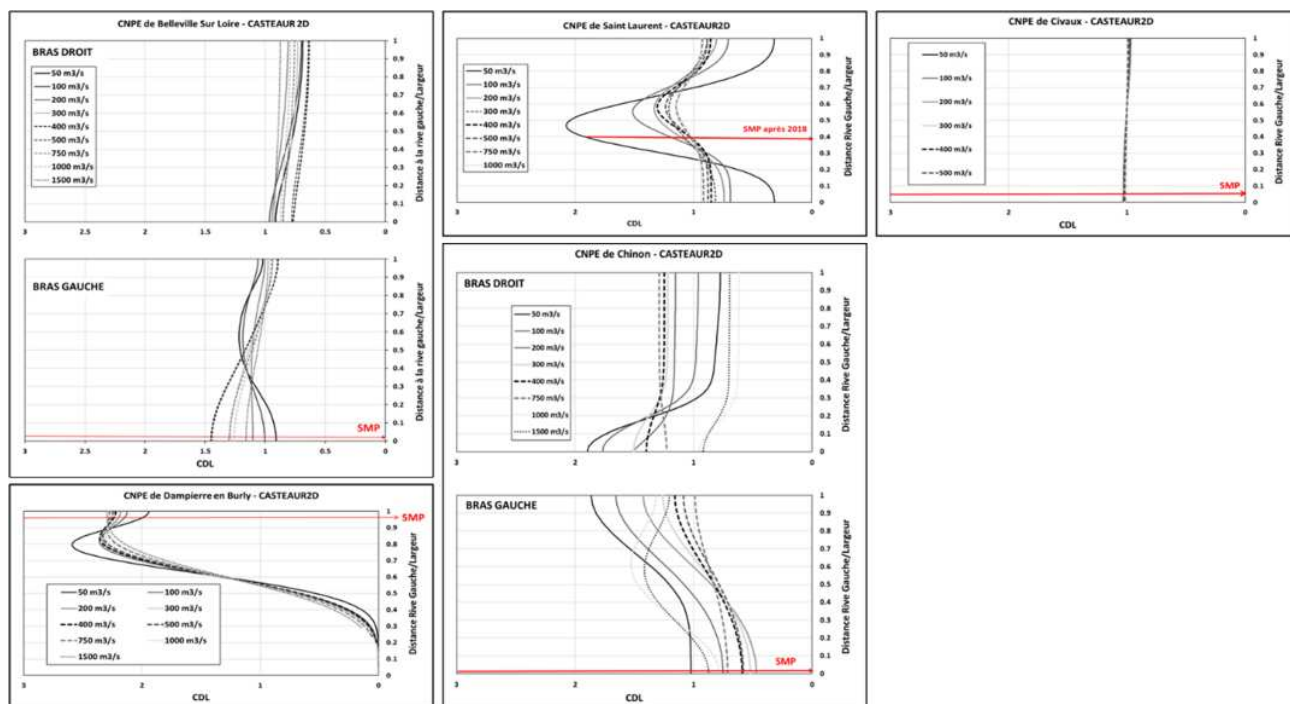


Figure 74 : Distributions transversales des CDL modélisées au droit des SMP aval en fonction des classes de débit

Ces résultats sont globalement cohérents avec les modélisations 1D et confirment que seule la SMP aval du CNPE de Civaux est positionnée en zone de mélange homogène des rejets. Les prélèvements de la SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire sont bien réalisés dans les panaches des rejets et d'autant plus que le débit augmente. C'est aussi le cas pour la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly où les prélèvements sont systématiquement près des pics des panaches. Depuis le déplacement du point de prélèvement à 70 m de la berge gauche, la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux donne des CDL proches de 1 représentatifs des panaches des rejets, ce qui n'était pas le cas lorsque les prélèvements étaient réalisés à la berge gauche en bordure des panaches. Néanmoins, le prélèvement est situé dans une zone de forte variation transversale des CDL, qui rend sa représentativité sensible à toute modification de l'écoulement qui décalerait légèrement le panache. Il est donc recommandé de régulièrement contrôler la représentativité de cette SMP aval. La situation est plus contrastée pour le CNPE de Chinon où les résultats sont cohérents avec ceux de l'étude [1] qui concluait que la représentativité de sa SMP aval est déficiente pour des débits de la Loire supérieurs à 100 m³/s.

CONCLUSIONS

Dans cette étude, le bon positionnement des Stations Multi-Paramètres (SMP) utilisées par EDF pour prélever les échantillons d'eau destinés à la surveillance réglementaire des eaux de la Loire et de la Vienne, a été étudié principalement au regard de deux indicateurs présentés ci-après.

Pour repérer les éventuelles défaillances dans la détection des augmentations de l'activité volumique des eaux lors des rejets du CNPE surveillé, l'étude s'est intéressée aux échantillons prélevés par les SMP aval pour lesquels l'activité volumique du tritium était inférieure au seuil de décision alors que le modèle prévoyait une activité volumique de tritium supérieure à 5 Bq/L. De telles situations pouvant traduire un problème de modélisation ou un mauvais positionnement de la SMP aval, leurs fréquences et leurs causes ont été étudiées.

Pour vérifier que les échantillons prélevés par chaque SMP aval sont bien prélevés dans la partie du cours d'eau où circule l'essentiel du tritium rejeté par son CNPE, appelée « veine des rejets », on s'est intéressé au rapport entre les activités volumiques de tritium mesurées et celles attendues par modélisation. Il a été considéré que si ce rapport est égal ou supérieur 1 lorsque le CNPE surveillé est le principal contributeur, cela signifie que les prélèvements sont bien effectués dans la veine des rejets et que les activités volumiques mesurées dans les échantillons rendent bien compte des activités circulant dans le cours d'eau.

Les résultats de l'analyse de ces deux indicateurs, effectuée pour toutes les gammes de débits du fleuve au niveau des SMP aval, sont présentés ci-après pour chaque CNPE.

Les rejets liquide de tritium du CNPE de Belleville sont toujours détectés dans les échantillons d'eau prélevés au moyen de sa SMP aval qui, bien que positionnée avant la zone de mélange homogène des rejets, prélève bien dans la veine des rejets et permet des mesures représentatives des rejets du CNPE lorsque les deux clarinettes de rejet sont utilisées. Néanmoins, la représentativité de la SMP aval pour des rejets qui seraient effectués par la seule clarinette côté rive droite n'est pas connue.

Il en est de même, de manière générale, pour la SMP située en aval du CNPE de Dampierre. Toutefois, l'étude a révélé un problème de détection et de représentativité sur la période allant de février à novembre 2017 qui pourrait résulter de la concomitance de deux événements : 1) le rejet des effluents liquides par une seule des deux clarinettes de rejet, la plus éloignée de la rive où se situe la SMP aval, et 2) la restitution en berge, en aval immédiat des rejets de sédiments dragués dans le canal d'amenée du CNPE, qui a pu contribuer à éloigner la veine de rejet de la SMP aval.

Depuis le déplacement, en 2018, du point de prélèvement de la SMP située en aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux à 70 m de la berge gauche, les rejets de ce site sont systématiquement détectés. Bien que située avant la zone de mélange homogène des rejets, la SMP prélève bien dans la veine des rejets. Avant ce déplacement fin 2018, un problème de représentativité des prélèvements existait, a priori depuis la modification de l'ouvrage de rejet en 1996, quand le CNPE est passé d'un rejet effectué en berge gauche à un rejet par une clarinette au milieu de Loire.

Dans le cas de Chinon, pour des débits de la Loire inférieurs à 100 m³/s, les prélèvements sont bien effectués dans la veine des rejets même si la distance de mélange homogène n'est pas atteinte. En revanche, pour les débits compris entre 100 et 500 m³/s, le positionnement de la SMP aval induit des problèmes de détection et/ou de représentativité des échantillons. Pour des débits supérieurs à 500 m³/s, les mesures sont trop variables et insuffisamment nombreuses pour permettre de conclure. Il est à noter que, à l'image du CNPE de Saint-Laurent-de-Eaux, ces problèmes datent sans doute de la modification de l'ouvrage de rejet qui est passé d'un rejet en berge gauche à un rejet par clarinette immergée en Loire, en 1999. Il convient d'indiquer qu'à la demande de l'ASN, EDF étudie actuellement les solutions techniques à mettre en œuvre pour permettre aux prélèvements effectués à la SMP aval de Chinon de systématiquement détecter et être représentatifs des rejets du CNPE dans toutes les conditions de débits.

Enfin, les rejets du site de Civaux sont toujours détectés quel que soit le débit de la Vienne et la SMP prélève bien dans la zone de mélange homogène des rejets du CNPE.

Ainsi, cette étude a montré que le positionnement des stations de mesure multi-paramètres situées en aval des CNPE de la Loire et de la Vienne, à l'exception du site de Chinon, permettent de détecter les rejets liquides du CNPE surveillé de façon satisfaisante et que les concentrations mesurées ces SMP aval étaient au moins égales à l'activité moyenne en tritium ajoutée par ces rejets. Elle a en outre permis de mieux comprendre et caractériser la dispersion des rejets liquides en aval de ces CNPE et a démontré la pertinence et l'utilité de la modélisation de la dispersion des rejets pour évaluer la

représentativité des mesures de surveillance et renforcer l'interprétation des données de la surveillance dans l'espace et dans le temps. Enfin, cette étude a apporté un éclairage complémentaire aux études de dilution par traçages liquides en investiguant sur une période pluriannuelle un plus grand nombre de régimes hydrauliques et conduit à être vigilant à l'impact que peuvent avoir les changements d'écoulement du cours d'eau et/ou de la configuration des rejets sur la représentativité des SMP aval, notamment pour les CNPE pouvant opérer les rejets par plusieurs conduites de rejet.

REFERENCES

- [1] IRSN, 2022, Etude du tritium dans la Loire au pont Cessart à Saumur. Rapport IRSN 2022-00034.
- [2] EDF, 2013, Etude de la dilution des effluents liquides du CNPE de St-Laurent. Référence EDF - CIDEN ELIER : 1300445 A.
- [3] Boyer, P., 2023, Code CASTEAUR2D - Note de principe - Modèle et notice. Rapport IRSN N° 2023-00714.
- [4] Rutherford, E., 1994. River Mixing. Chichester: J.Wiley & Sons.
- [5] Boyer, P., 2023, Code CASTEAUR2D - Note de principe - Modèle et notice. Rapport IRSN N° 2023-00714.
- [6] EDF, 2017, Etude de la dilution en Loire des rejets liquides du CNPE de Belleville-sur-Loire, Référence DIPDE_2ED-ENV : D455616011745 B.
- [7] EDF, 2015, Etude de la dilution des effluents liquides du CNPE de Dampierre. Référence Note interne - CIDEN ELIER 1400705 A.
- [8] EDF, 2023, Réponse au courrier ASN/DEU du 16/11/2022 sur le positionnement des SMP aval des sites bord de rivière, référence EDF ING/DIPDE/DE : D455623045440 Indice B.
- [9] EDF, 2020, Etude de la dilution en Loire des rejets liquides du CNPE de Chinon, Référence DIPDE_2ED-ENV : D455620078347 A.
- [10] IPSN, 1996. Dispersion des effluents liquides de la centrale de Civaux : Synthèse des études expérimentales de traçage en Vienne. Rapport DPRE/SERE N°96 / 024.
- [11] IPSN, 1997. Dispersion des effluents liquides de la centrale de Civaux. Rapport DPRE/SERE N° 97/006.

ANNEXES

8.1 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 CASTEAUR 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 d'indice b , chacun discrétisé en section de calcul notée b, i . Chaque bief b est caractérisé par sa longueur (L_b), une suite de sections trapézoïdales discrétisée au pas d'espace Δx et localisées par leur position dans le bief ($PK_{b,i}$), une largeur au plafond (l_b), l'angle des berges (θ_b), une rugosité quantifiée par un coefficient de Strickler (Ks_b) et une pente (i_b).

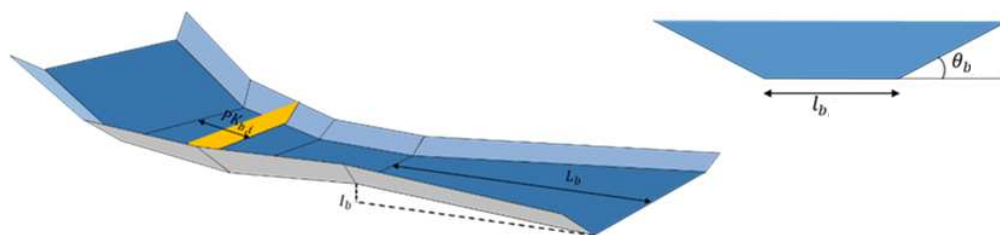


Figure 75 : Représentation du cours d'eau dans le code CASTEAUR

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

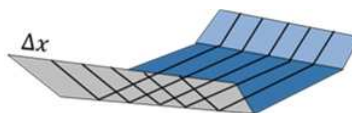


Figure 76 : Illustration du maillage d'un bief au pas d'espace Δx

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 :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \sigma_w \quad \text{Équation 1}$$

$$U = K S \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{-i} \quad \text{Équation 2}$$

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) :

$$S = h \times \left(l + \frac{h}{\tan \theta} \right) \quad \text{Équation 3}$$

Avec la relation $Q = U \cdot S$, h devient la seule inconnue des équations 1 et 2 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 et des pertes par les défluent.

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 :

$$\frac{\partial C_T \cdot S}{\partial t} + \frac{\partial (Q \cdot C_T)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(S \cdot K \cdot \frac{\partial C_T}{\partial x} \right) + \sigma_{C_T} \quad \text{Équation 4}$$

Avec : t , le temps (s), x , la distance (m), C_T , la concentration en tritium ($Bq.m^{-3}$), S , la section mouillée trapézoïdale (m^2), 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 hydrographiques et hydrauliques, 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 6 : 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		
	Pour chaque section :	PK dans le bief	(m)
		Largeur au plafond	(m)
		Angle des berges	(°)
2. Hydraulique	Débits amont et entrants par les affluents		(m ³ /s)
	Débits de perte aux défluentes		(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)

8.2 PREPARATION DU JEU DE DONNEES POUR LA MODELISATION 1D

Comme annoncé au paragraphe 3.2, la préparation du jeu de données nécessaire à la modélisation se déroule en trois étapes :

- constitution d'un modèle du réseau fluvial de la Loire et la Vienne depuis les amonts des CNPE de Belleville et de Civaux jusqu'en aval de Saumur,
- collecte et prétraitement des données de débit de la Loire et la Vienne pour modéliser l'hydraulique et évaluer les débits et les vitesses de transfert sur l'ensemble du réseau et sur la période étudiée,
- compilation et prétraitement des données de rejet de tritium des 5 CNPE du bassin versant de la Loire et de la Vienne pour modéliser le transfert du tritium sur l'ensemble du réseau et sur la période étudiée.

Ces étapes sont décrites dans les trois sous paragraphes suivants.

Modélisation du réseau fluvial

Un cours d'eau est modélisé dans SYMBIOSE par un linéaire qui peut être généré automatiquement par un préprocesseur spatial qui exploite des bases de données géographiques. Le cours d'eau est découpé en biefs (tronçons du cours d'eau) dont les caractéristiques sont supposées homogènes - notamment la largeur, la pente, l'angle des berges et 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 de l'ensemble de ces biefs (e.g. distance curviligne, largeur, pente, affluents, défluents, etc.). L'IRSN a ainsi constitué une bibliothèque de paysages géoréférencés spécifiques à chaque CNPE d'EDF et comportant, en particulier, les linéaires modélisés de la Loire et de la Vienne.

Les paysages de cette bibliothèque ont été utilisés dans cette étude pour constituer un réseau composé 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 de Saumur. Les entrées du réseau ont été choisies par rapport aux stations HYDRO qui permettent de connaître les flux d'eau (débits) quotidiens entrants.

Lors de l'étude du tritium dans la Loire au pont Cessart à Saumur réalisée par l'IRSN [1], les largeurs de la Loire, prises par défaut dans la bibliothèque précitée, avaient été ajustées à partir d'images satellitaires prises en période d'étiage de la Loire. C'est ce linéaire adapté qui a été repris pour la présente étude. Les angles des berges de la Loire (10°) et de la Vienne (80°) ont été établis sur la base des données utilisées dans [1] disponible sur le site Internet de l'IRSN.

Le coefficient de Strickler prend en compte les pertes de charge par frottement en fonction de la rugosité du fond et des berges (l'écoulement est d'autant plus ralenti que les rugosités sont fortes) pour déterminer les hauteurs d'eau et les vitesses de l'écoulement. L'ajustement de ce coefficient se fait classiquement par calage sur des jeux de données constitués de mesures de hauteur d'eau et de débit et/ou de temps de transfert. Cette valeur déterminant la vitesse d'écoulement, elle influence en particulier les délais d'arrivée des fronts de rejet des différents CNPE en un point donné du cours d'eau. La comparaison en un point des activités volumiques en tritium simulées aux activités mesurées, pour différentes valeurs de ce coefficient, permet de retenir la valeur permettant de réduire les différences en synchronisant au plus près les fronts (montants et descendants) d'activités simulées et observées en ce point. Bien que le coefficient de Strickler puisse varier le long d'un cours d'eau et dans le temps, les comparaisons modèle-mesure de la présente étude se sont révélées satisfaisantes aux SMP aval des 5 CNPE pour les valeurs calibrées au cours de l'étude du tritium dans la Loire au pont Cessart à Saumur [1] : $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour les biefs de la Vienne et $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour les biefs de la Loire.

— Calcul hydraulique

Les apports d'eau entrants dans le modèle par les points amont des linéaires de la Loire et de la Vienne sont les débits quotidiens respectivement renseignés dans la banque HYDRO aux stations de Saint-Satur et Lussac-les-Châteaux.

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 : Gien, Blois, Onzain, Tours et Langeais pour la Loire et à Chauvigny, Ingrandes, Nouâtre et Chinon pour la Vienne (Figure 77). Ce calage consiste à injecter dans le modèle une chronique d'apport au niveau de chacune de ces stations, en soustrayant la chronique des débits mesurés à la chronique des débits simulés par la propagation des apports amont.

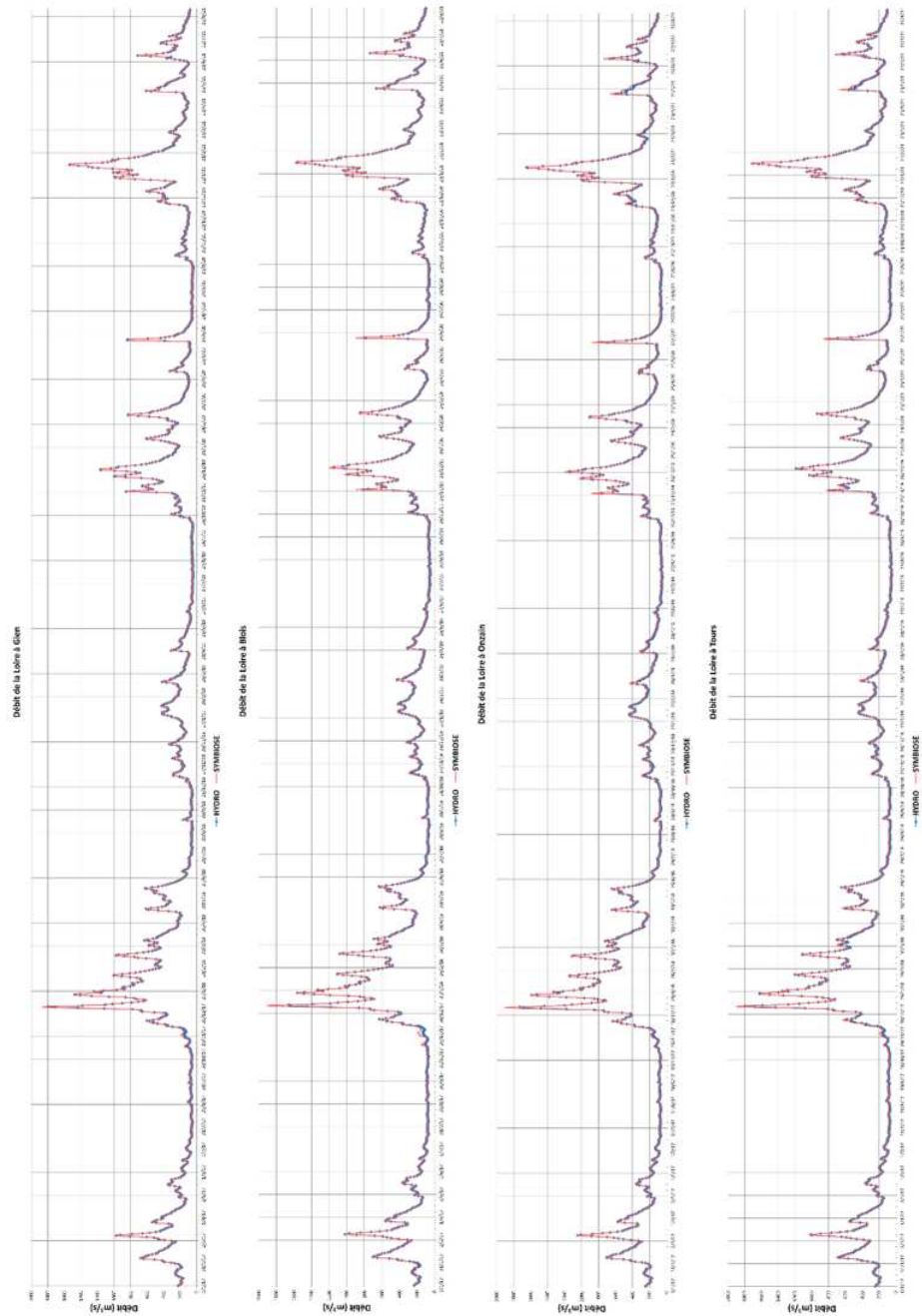
Au niveau de la confluence de l'Indre et de la Loire, il n'y a pas de station HYDRO. Cependant, il est tenu compte d'une chronique d'apport à ce niveau, calculée par la différence entre les débits mesurés à la station HYDRO de Saumur (première station HYDRO en aval de l'Indre) et ceux simulés à Saumur en tenant compte des apports amont de la Loire et de la Vienne, afin de garantir des débits cohérents au niveau de Saumur.

Enfin, il est à noter que la station HYDRO d'Orléans n'a pas été exploitée, du fait d'un phénomène local sur une trentaine de kilomètres lié au sous-sol calcaire de cette région et à un système karstique qui induit des échanges hydriques significatifs entre la Loire et les eaux souterraines. Ainsi, pour une large gamme de débits de la Loire, une partie du débit 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 à une dizaine de km en aval d'Orléans. Ce point est discuté plus avant dans la section dédiée à la SMP aval de Saint-Laurent-des-Eaux (4.3).



Figure 77 : 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)

La comparaison des débits calculés par SYMBIOSE, à la suite de cette procédure de calage itératif d'amont en aval avec les débits mesurés aux stations HYDRO retenues pour la Loire et la Vienne montre une bonne cohérence modèle-mesures (cf. Figure 78 pour la Loire et Figure 79 pour la Vienne).



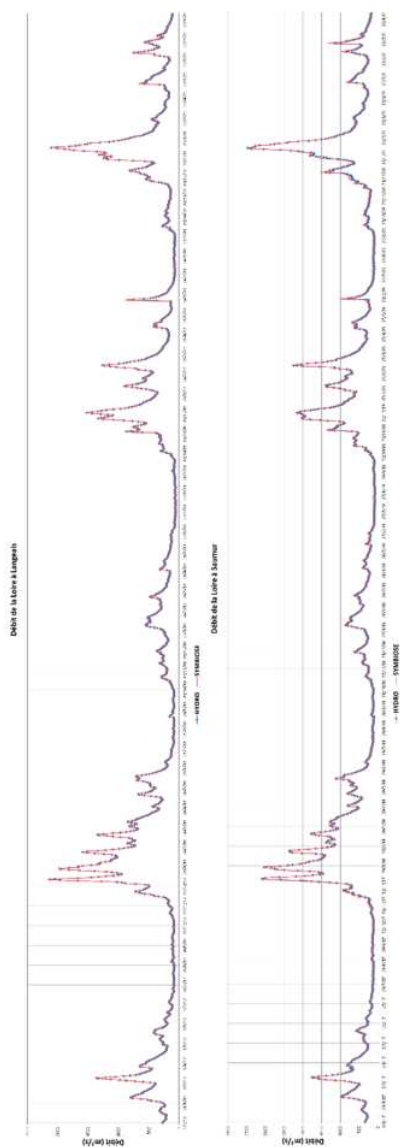


Figure 78 : Comparaison modèle-mesures des débits de la Loire au niveau des stations HYDRO de calage, sur la période de janvier 2017 à avril 2021

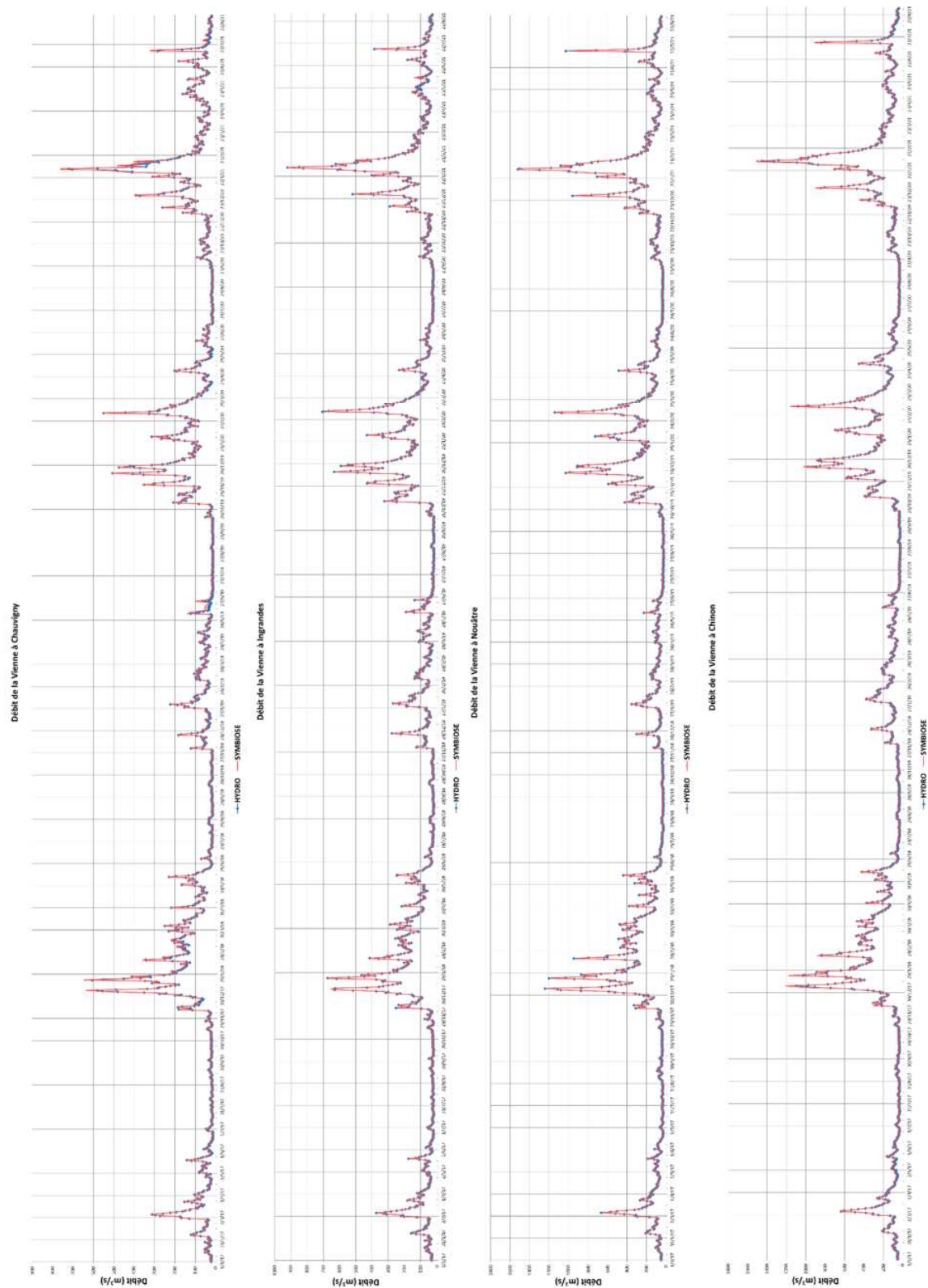


Figure 79 : Comparaison modèle-mesures des débits de la Vienne au niveau des stations HYDRO de calage, sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Rejets de tritium des CNPE

Les données de rejet de tritium nécessaires aux calculs SYMBIOSE sont les chroniques de débit volumique (m^3/s) et l'activité volumique en tritium (Bq/m^3) des effluents rejetés.

Pour cette étude, EDF a transmis à l'IRSN les données de rejet des 5 CNPE de janvier 2017 à avril 2021 qui sont consignées dans les registres de rejet que EDF transmet mensuellement à l'ASN. Pour chaque rejet, ces données donnent l'activité volumique en tritium de l'effluent, le volume d'effluent rejeté ainsi que les dates, à la minute près, de début et de fin de rejet qui peuvent couvrir des périodes de quelques heures à quelques jours. Un rejet d'effluent pouvant être fractionné, les informations sur le volume et les dates de début et de fin de rejet ont été également transmises pour chaque fraction rejetée le cas échéant.

Les données recueillies ont été prétraitées pour fournir les données d'entrée attendues par SYMBIOSE – en particulier les débits de rejet qui ne figurent pas explicitement dans les registres de rejet. Avec l'hypothèse que les dynamiques de rejet restent constantes, le débit volumique moyen de rejet de chaque effluent (ou de la fraction d'effluent quand il est fractionné), est calculé en divisant le volume rejeté (ou la fraction de l'effluent le cas échéant) par la durée du rejet.

La Figure 80 présente les rejets mensuels de tritium de chaque CNPE sur la Loire et sur la Vienne, de janvier 2017 à avril 2021.

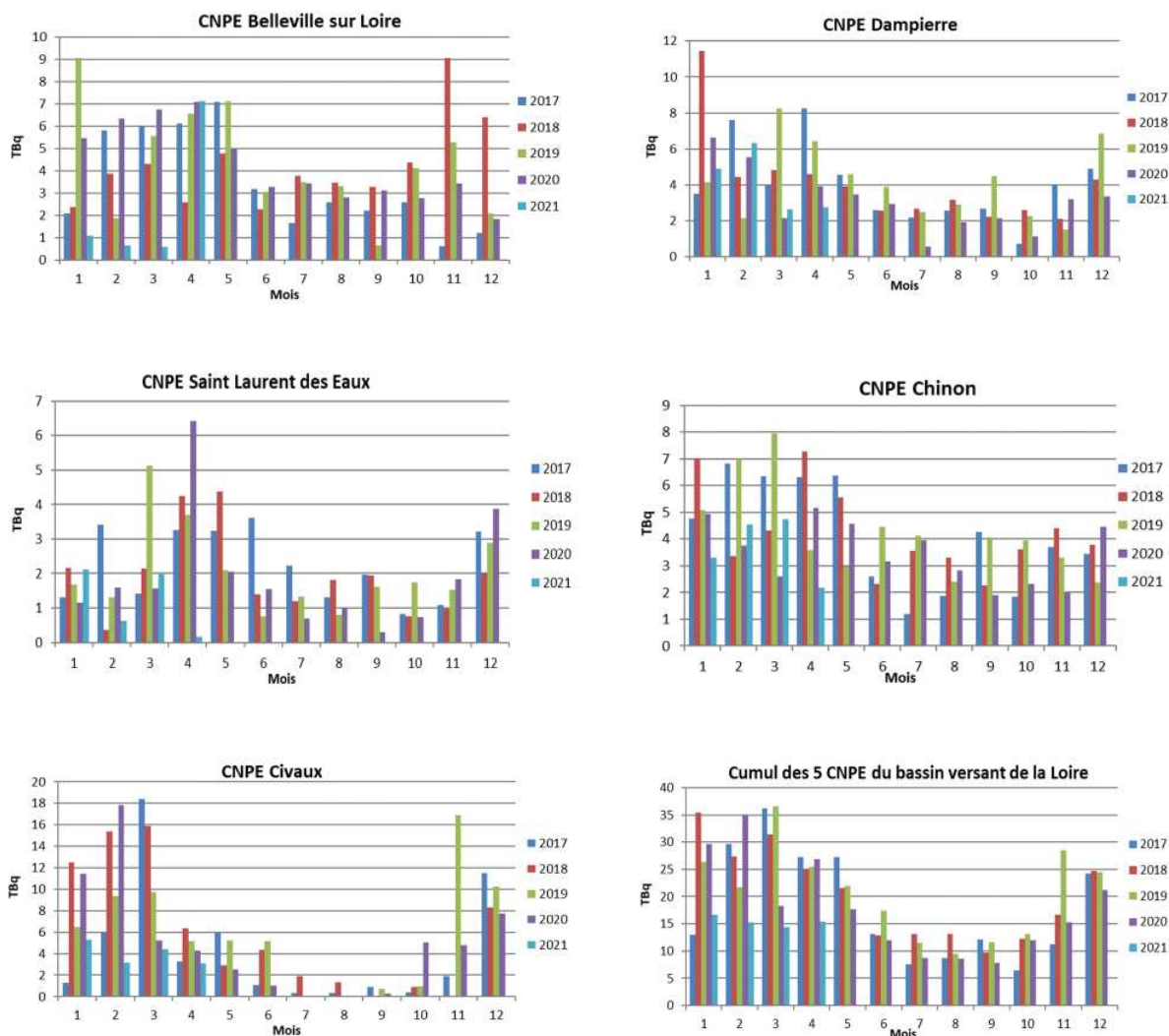
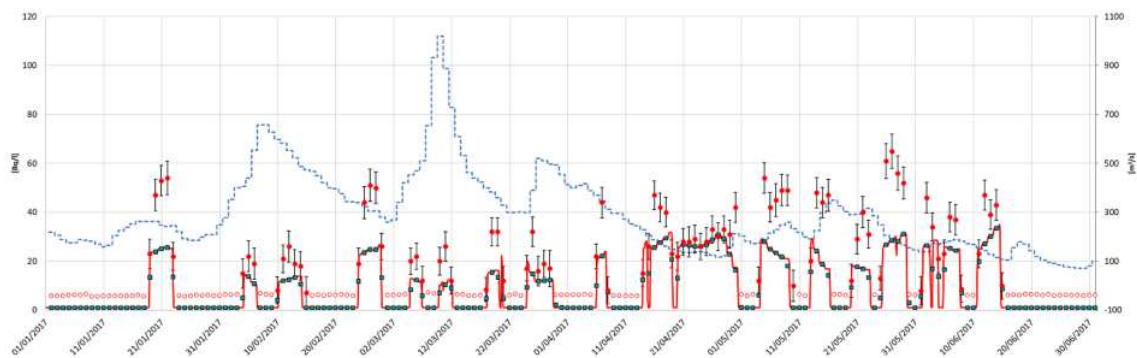


Figure 80 : Rejets liquides mensuels en tritium des CNPE du bassin versant de la Loire entre janvier 2017 et avril 2021

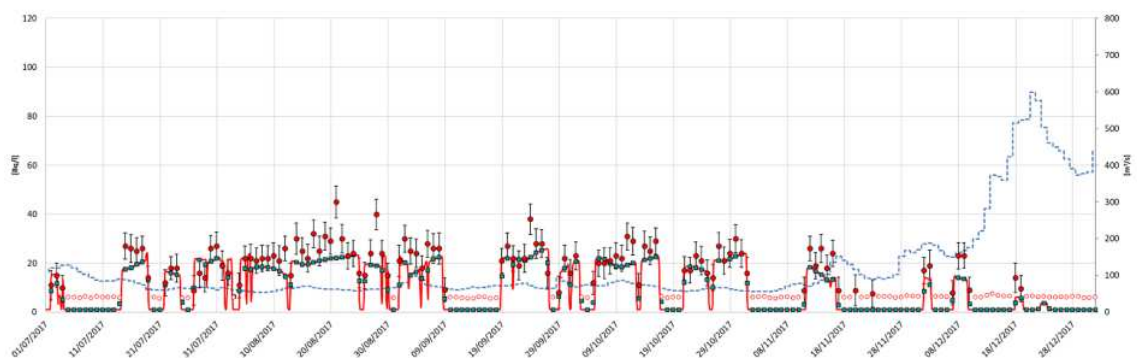
8.3 COMPARAISONS MODELE 1D-MESURES

Belleville-sur-Loire

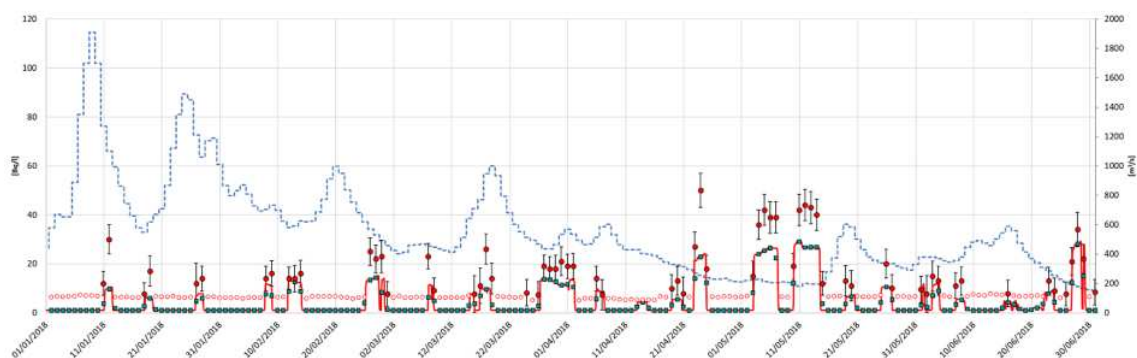
1ER SEMESTRE 2017



2ND SEMESTRE 2017



1ER SEMESTRE 2018



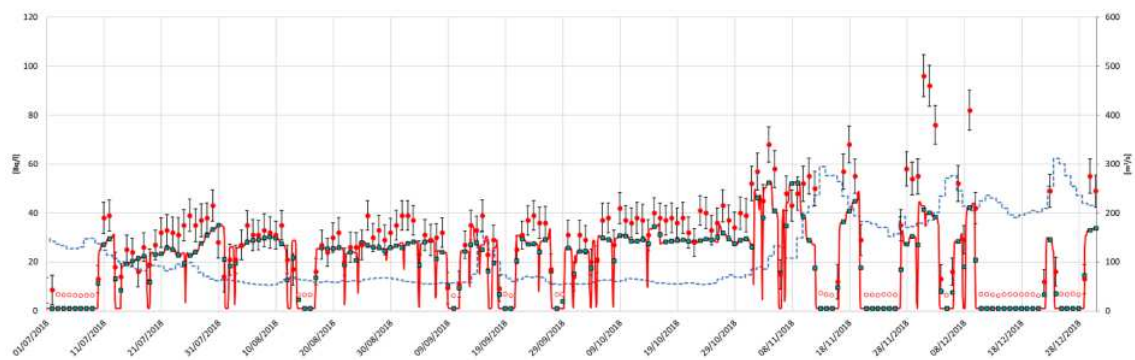
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

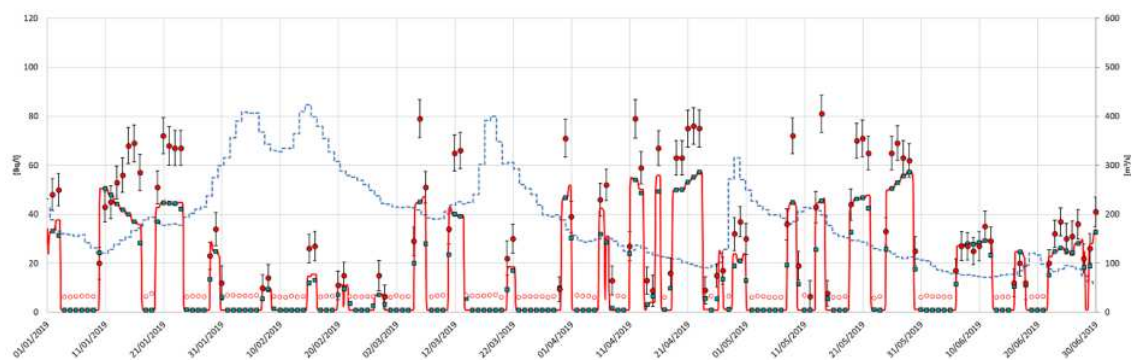
Modélisation SYMBIOSE

- Belleville et bruit de fond
- Belleville et bruit de fond, moyenne journalière
- Débit Loire

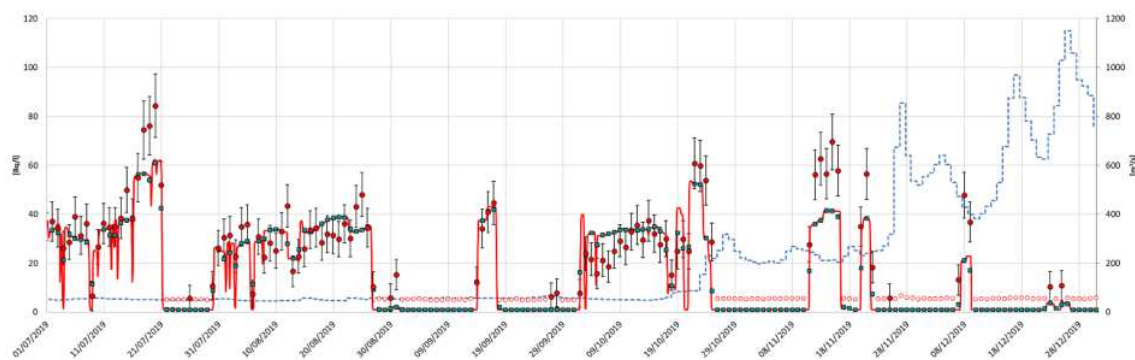
2ND SEMESTRE 2018



1ER SEMESTRE 2019



2ND SEMESTRE 2019



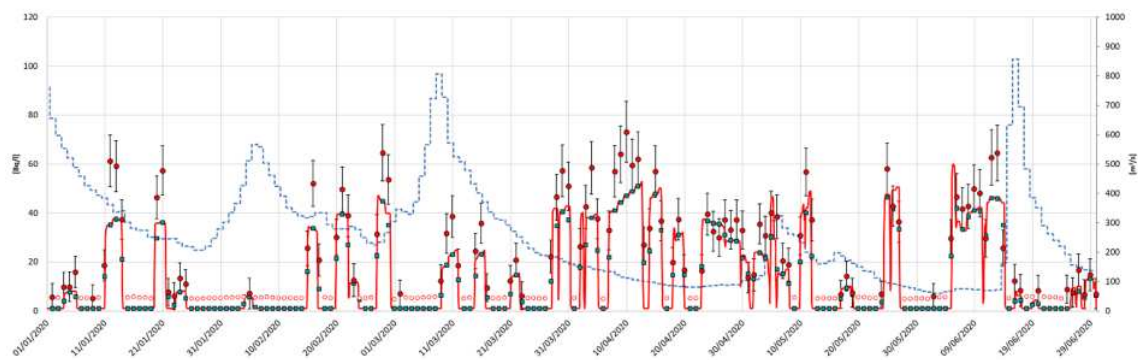
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

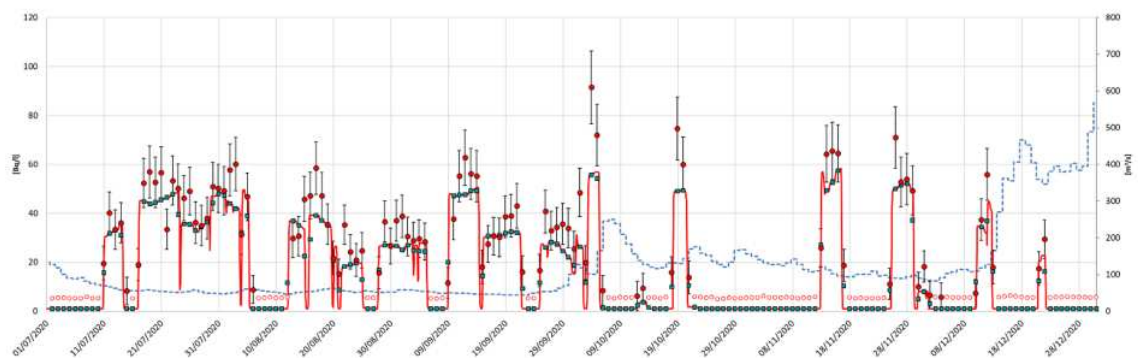
Modélisation SYMBIOSE

- Belleville et bruit de fond
- Belleville et bruit de fond, moyenne journalière
- Débit Loire

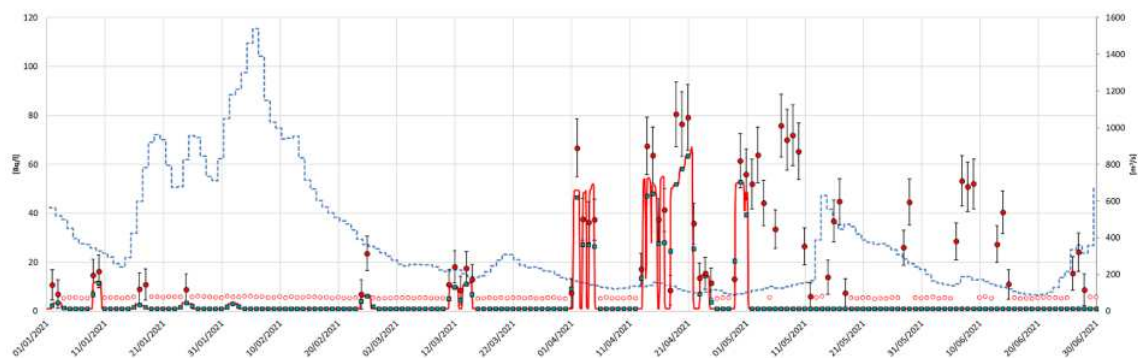
1ER SEMESTRE 2020



2ND SEMESTRE 2020



1ER SEMESTRE 2021



Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

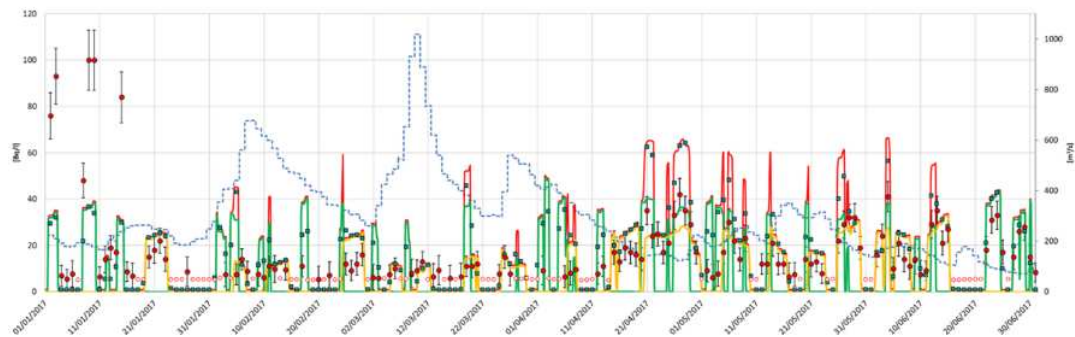
Modélisation SYMBIOSE

- Belleville et bruit de fond
- Belleville et bruit de fond, moyenne journalière
- - - Débit Loire

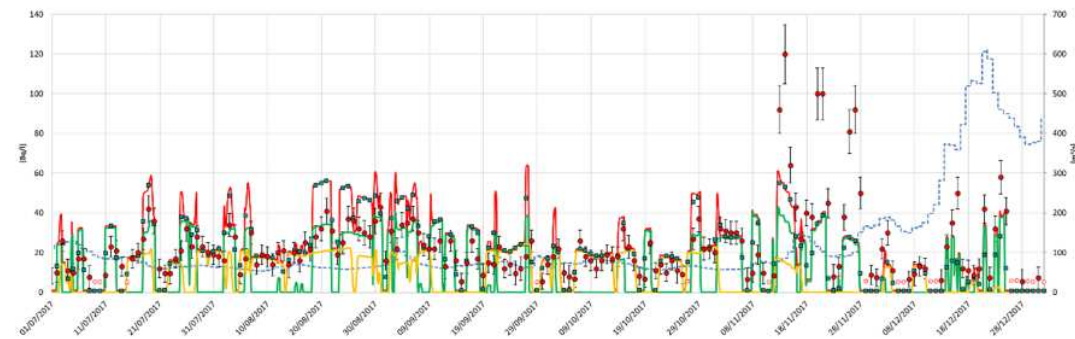
Figure 81 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Belleville-sur-Loire, sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Dampierre-en-Burly

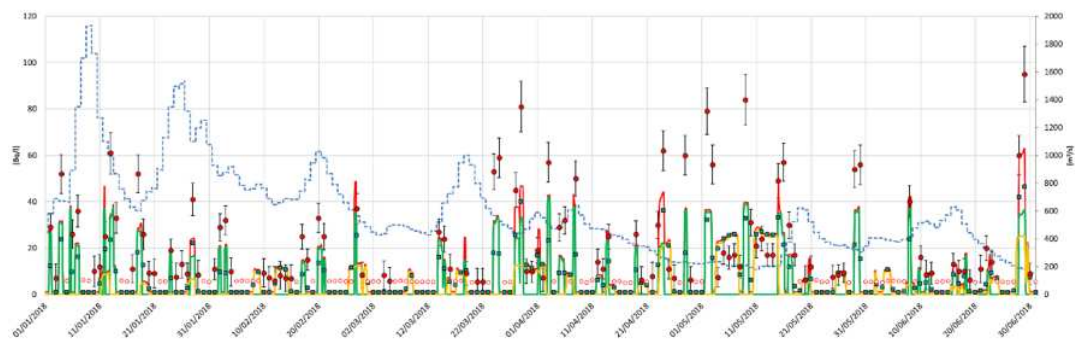
1ER SEMESTRE 2017



2ND SEMESTRE 2017



1ER SEMESTRE 2018



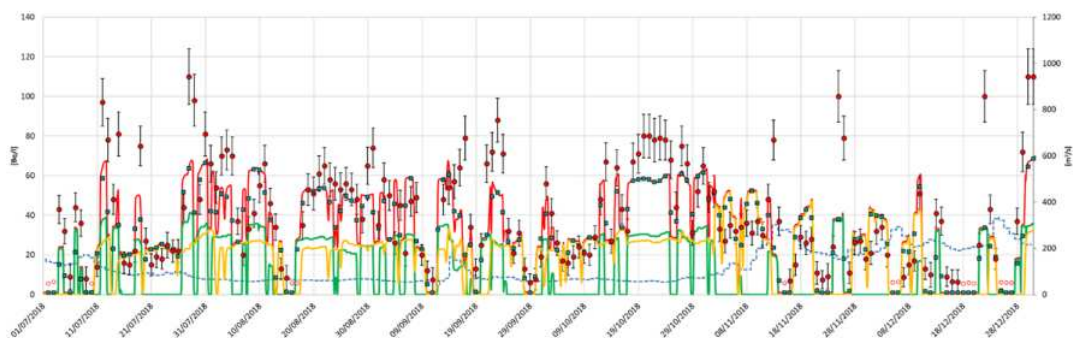
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

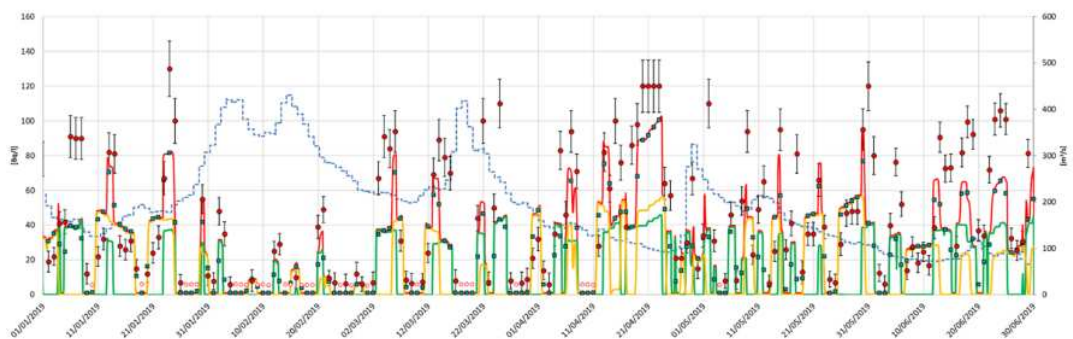
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond), moyenne journalière
- Contribution Dampierre
- Contribution amont de Dampierre
- Débit Loire

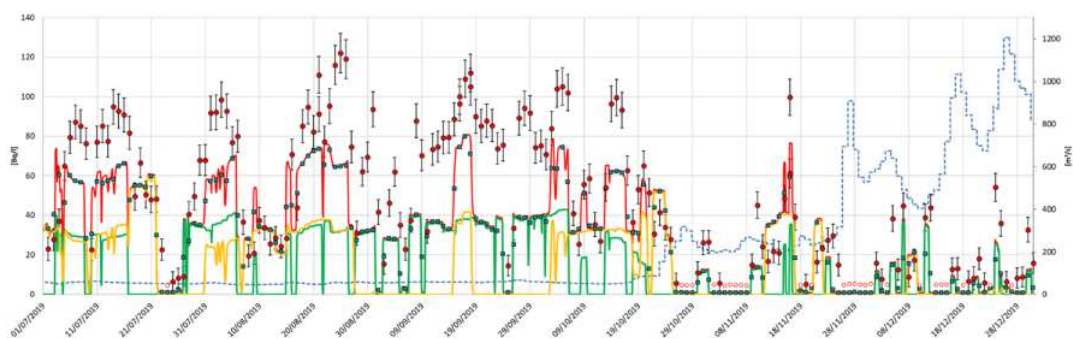
2ND SEMESTRE 2018



1ER SEMESTRE 2019



2ND SEMESTRE 2019



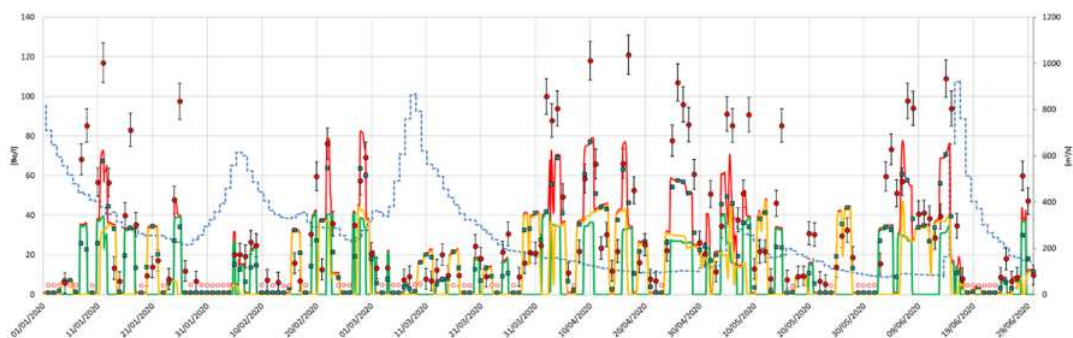
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

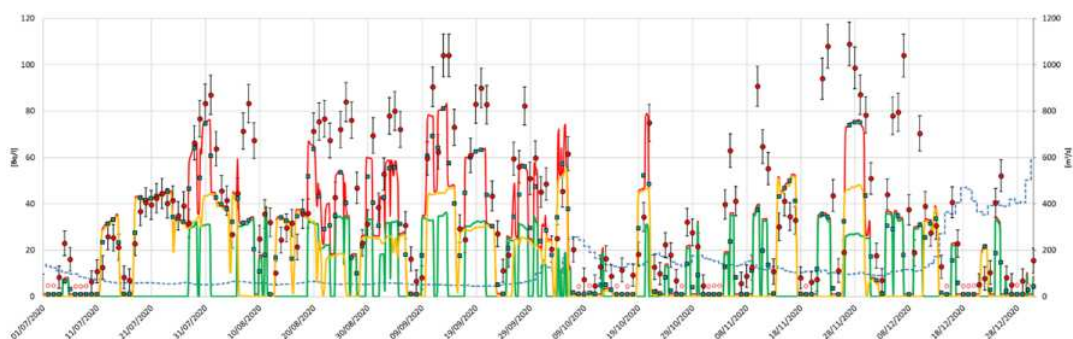
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond), moyenne journalière
- Contribution Dampierre
- Contribution amont de Dampierre
- Débit Loire

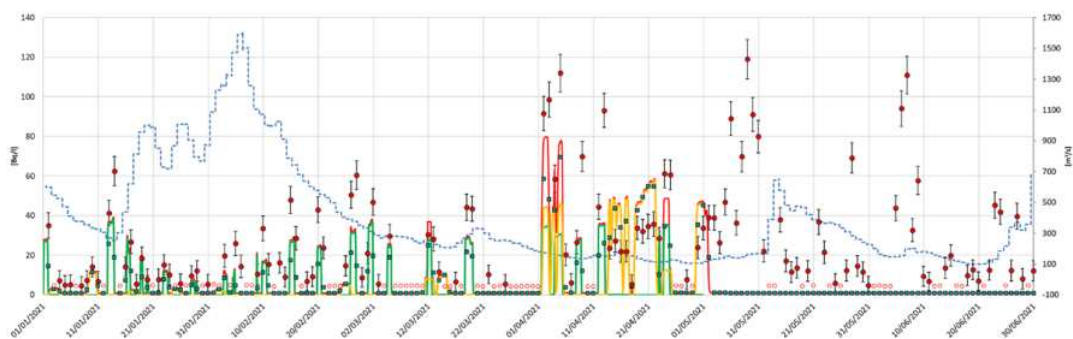
1ER SEMESTRE 2020



2ND SEMESTRE 2020



1ER SEMESTRE 2021



Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

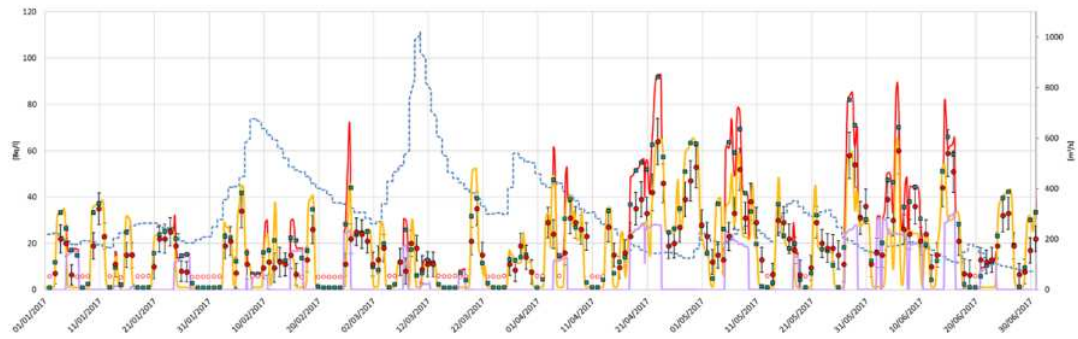
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond, moyenne journalière)
- Contribution Dampierre
- Contribution amont de Dampierre
- Débit Loire

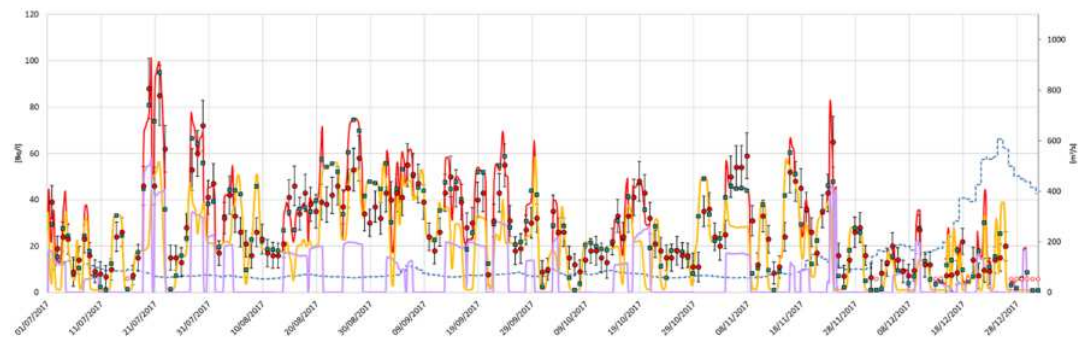
Figure 82 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Dampierre-en-Burly, sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Saint-Laurent-des-Eaux

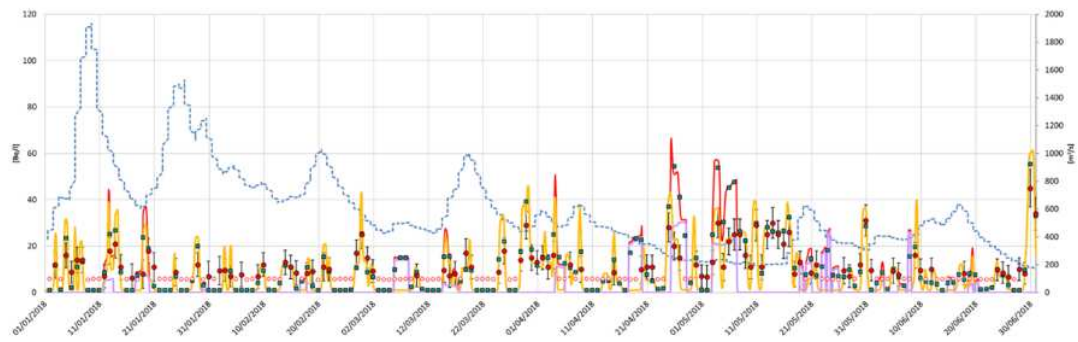
1ER SEMESTRE 2017



2ND SEMESTRE 2017



1ER SEMESTRE 2018



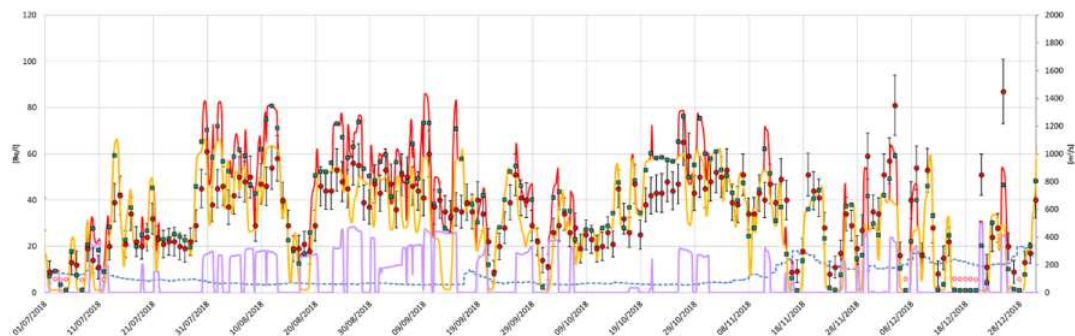
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

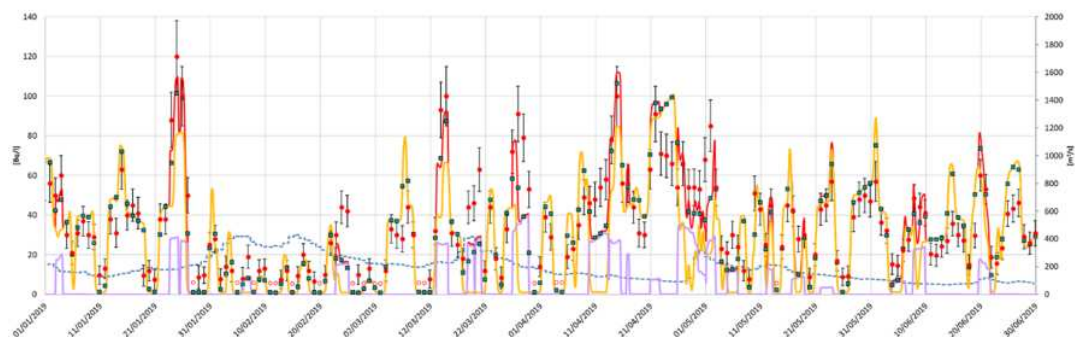
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond), moyenne journalière
- Contribution amont de Saint Laurent (CNPE et bruit de fond)
- Contribution Saint Laurent
- Débit Loire

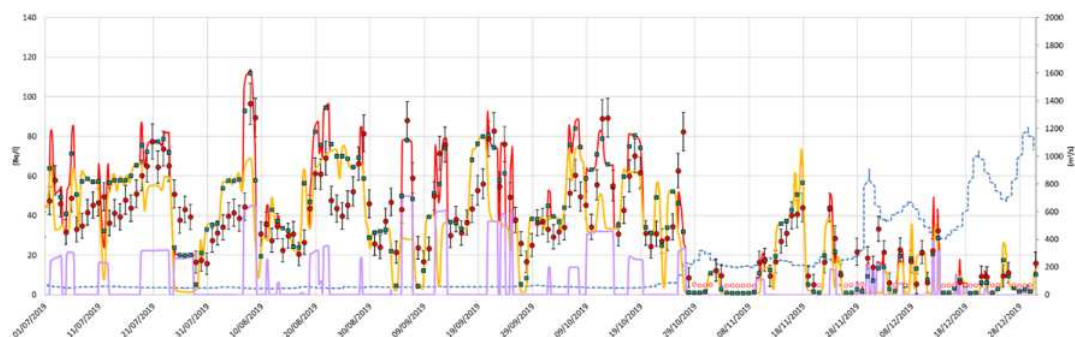
2ND SEMESTRE 2018



1ER SEMESTRE 2019



2ND SEMESTRE 2019



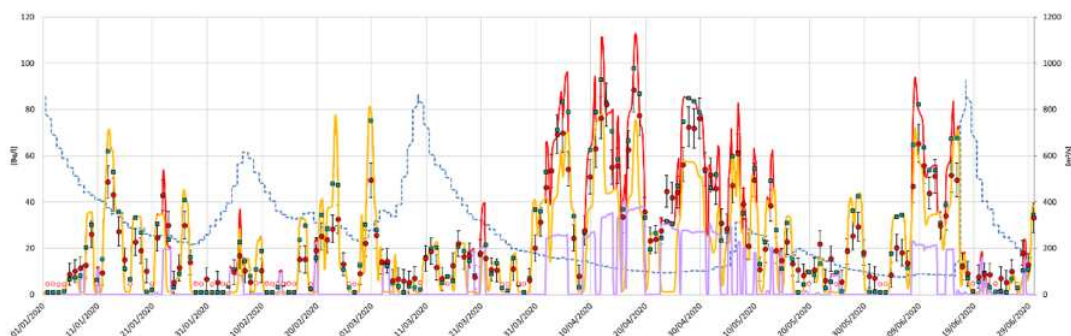
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

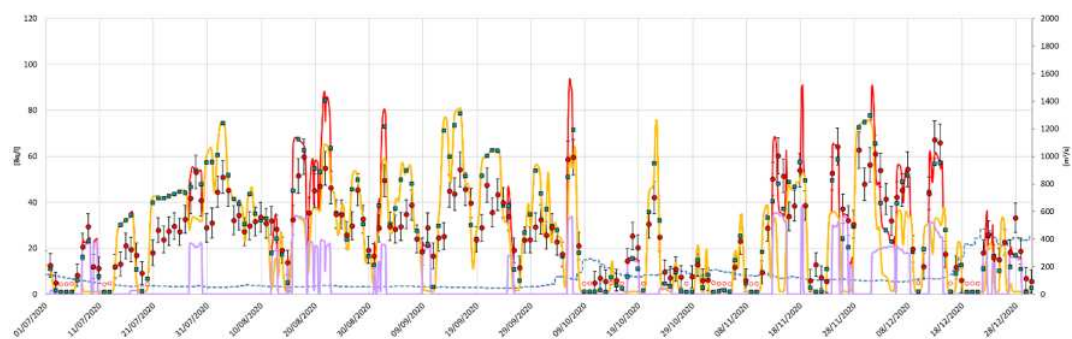
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond), moyenne journalière
- Contribution amont de Saint Laurent (CNPE et bruit de fond)
- Contribution Saint Laurent
- Débit Loire

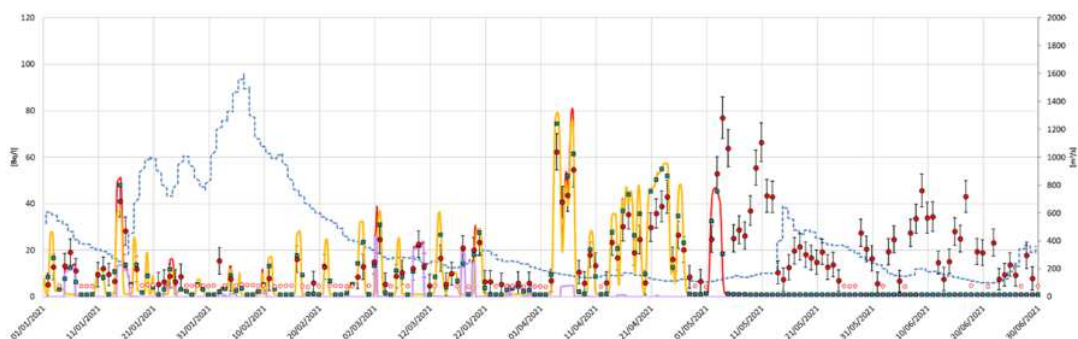
1ER SEMESTRE 2020



2ND SEMESTRE 2020



1ER SEMESTRE 2021



Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

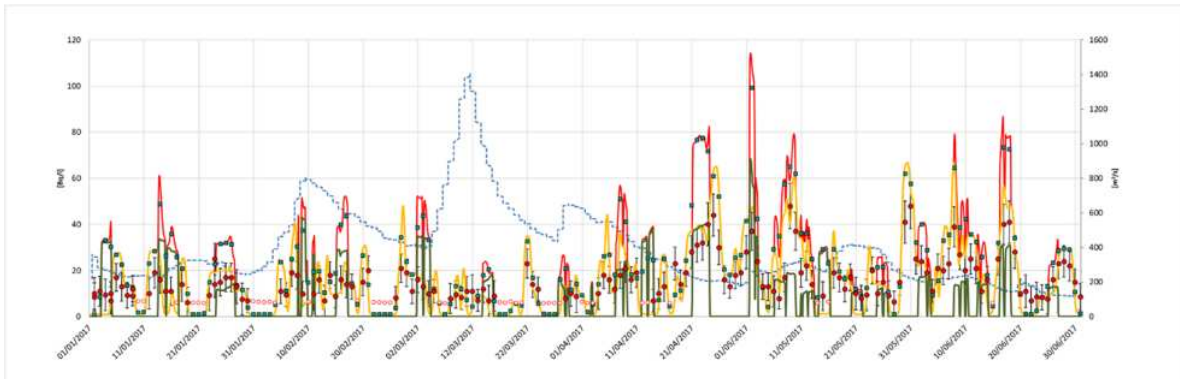
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond), moyenne journalière
- Contribution amont de Saint Laurent (CNPE et bruit de fond)
- Contribution Saint Laurent
- Débit Loire

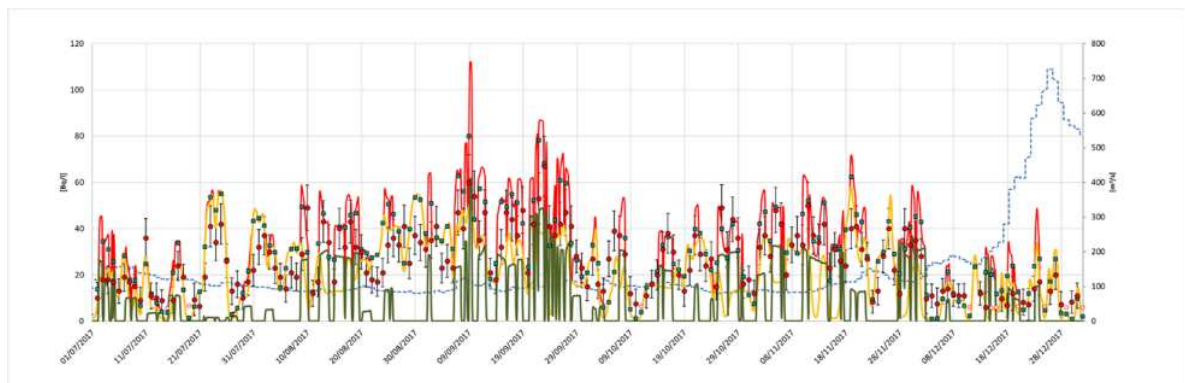
Figure 83 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Saint Laurent, sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Chinon

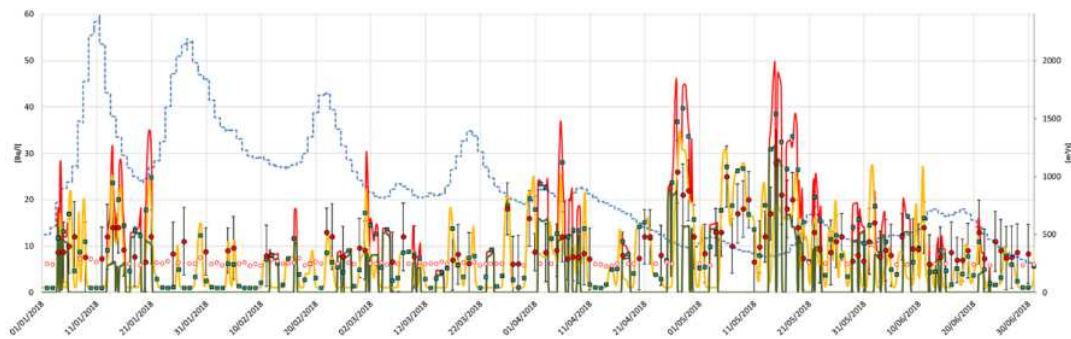
1ER SEMESTRE 2017



2ND SEMESTRE 2017



1ER SEMESTRE 2018



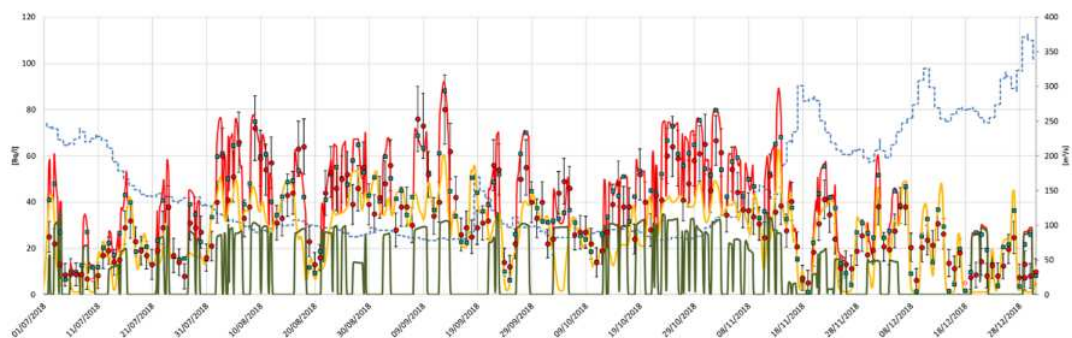
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

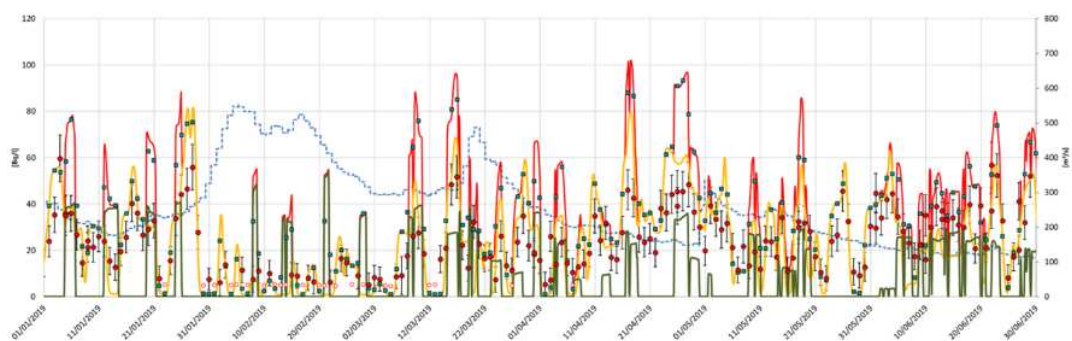
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond), moyenne journalière
- Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond)
- Contribution Chinon
- Débit Loire

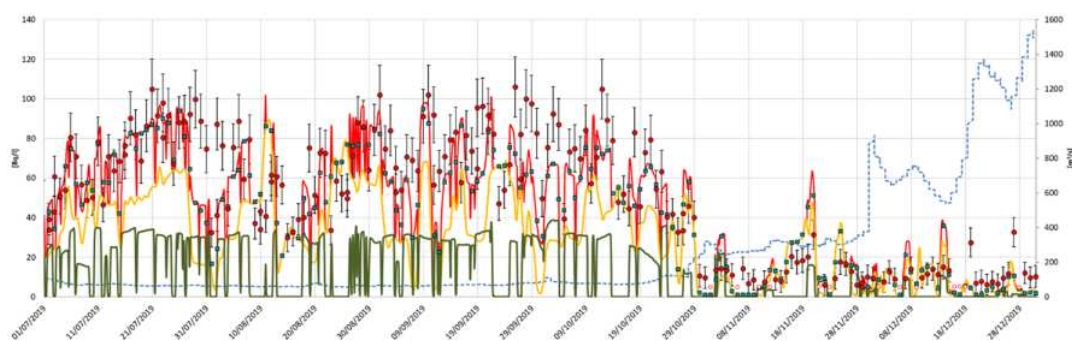
2ND SEMESTRE 2018



1ER SEMESTRE 2019



2ND SEMESTRE 2019



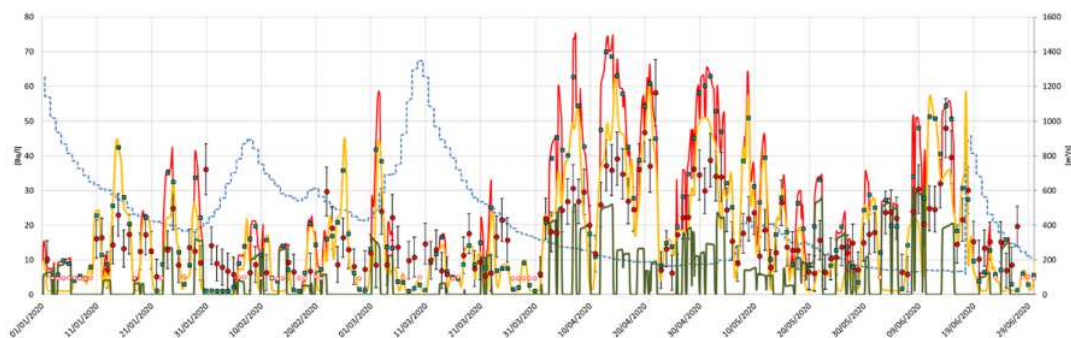
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

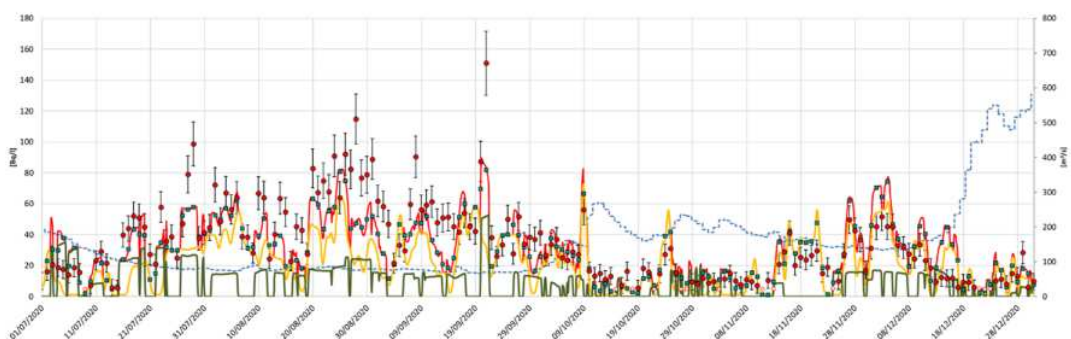
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond), moyenne journalière
- Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond)
- Contribution Chinon
- Débit Loire

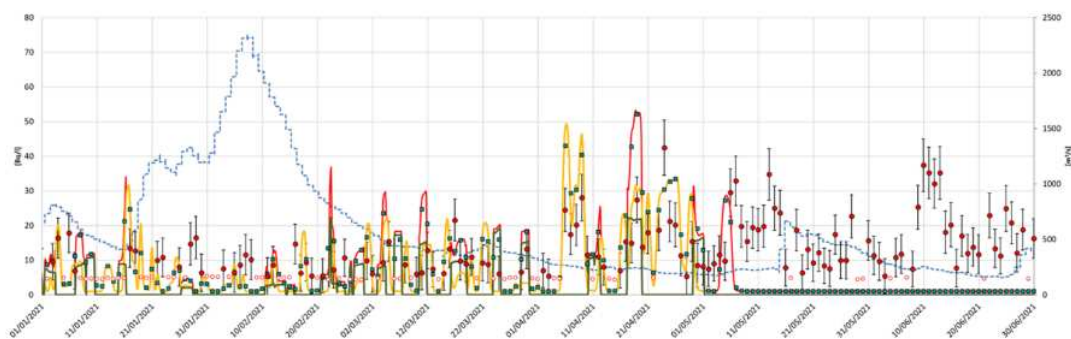
1ER SEMESTRE 2020



2ND SEMESTRE 2020



1ER SEMESTRE 2021



Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

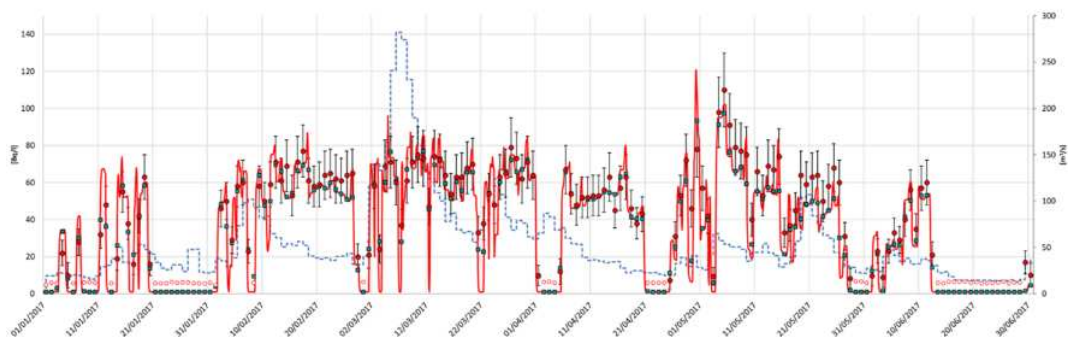
Modélisation SYMBIOSE

- Total (tous CNPE et bruit de fond)
- Total (tous CNPE et bruit de fond), moyenne journalière
- Contribution amont de Chinon (CNPE et bruit de fond)
- Contribution Chinon
- Débit Loire

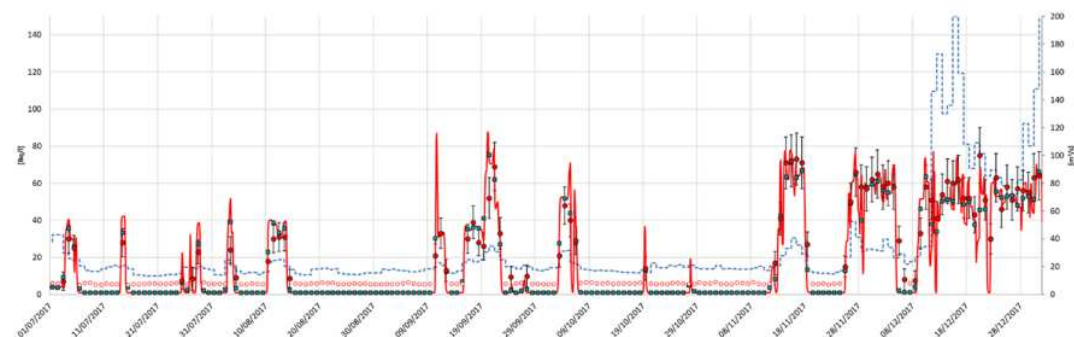
Figure 84 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Chinon, sur la période de janvier 2017 à avril 2021

Civaux

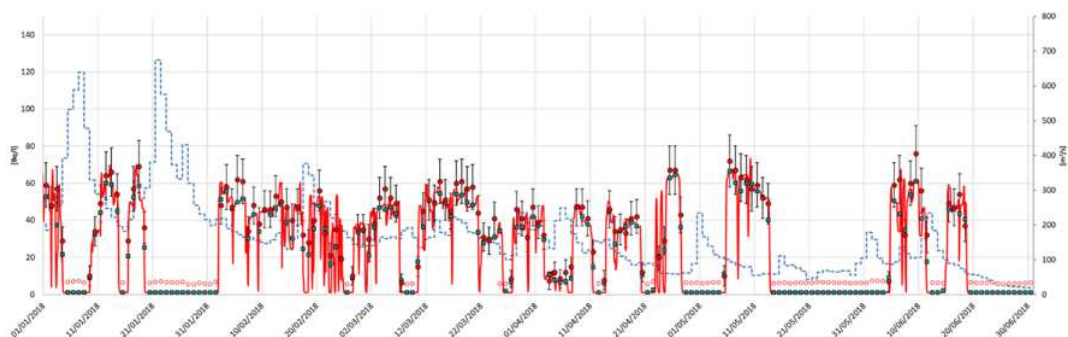
1ER SEMESTRE 2017



2ND SEMESTRE 2017



1ER SEMESTRE 2018



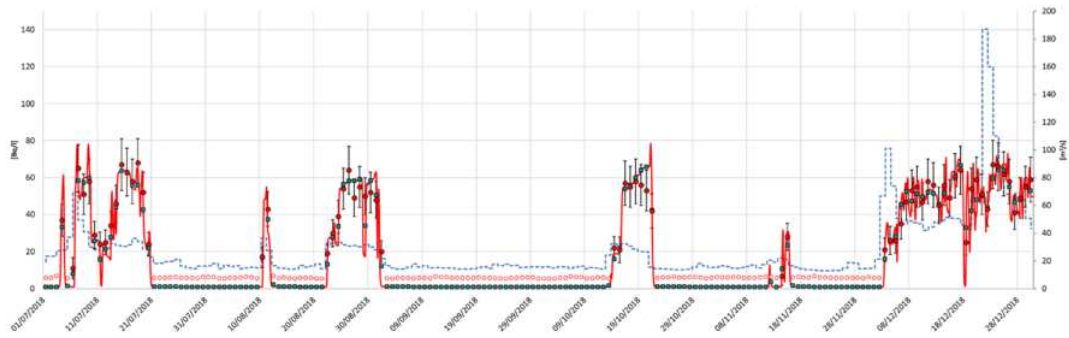
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

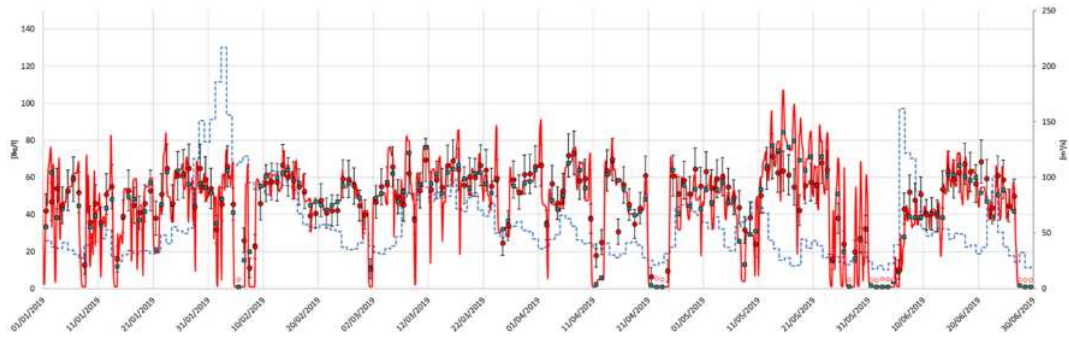
Modélisation SYMBIOSE

- Civaux et bruit de fond
- Civaux et bruit de fond, moyenne journalière
- Débit Vienne

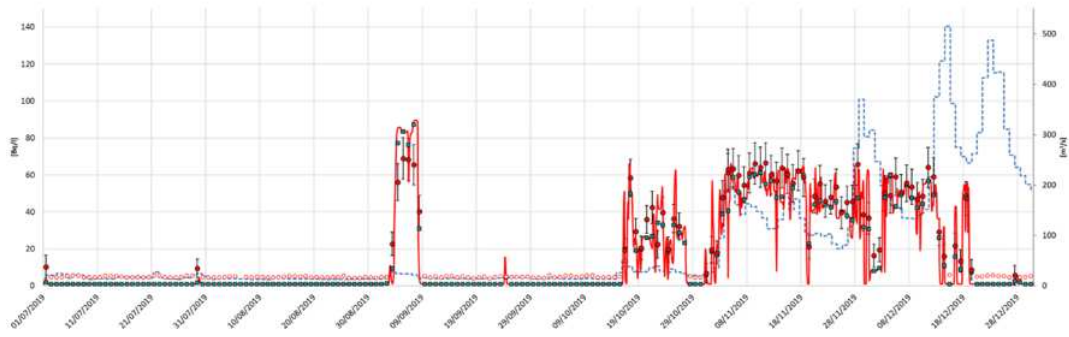
2ND SEMESTRE 2018



1ER SEMESTRE 2019



2ND SEMESTRE 2019



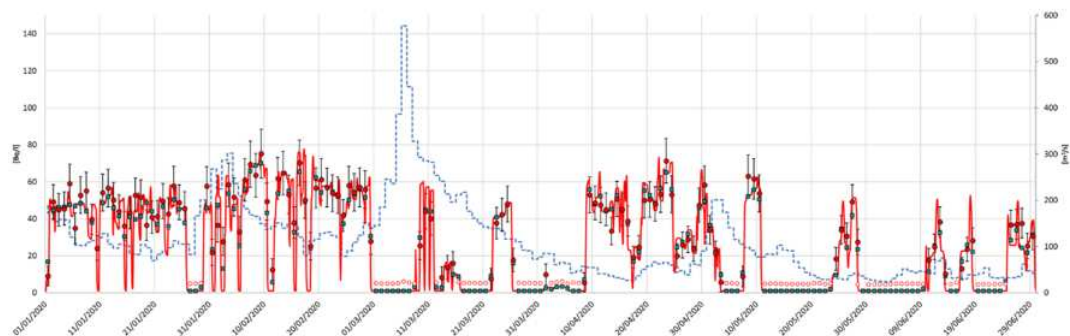
Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

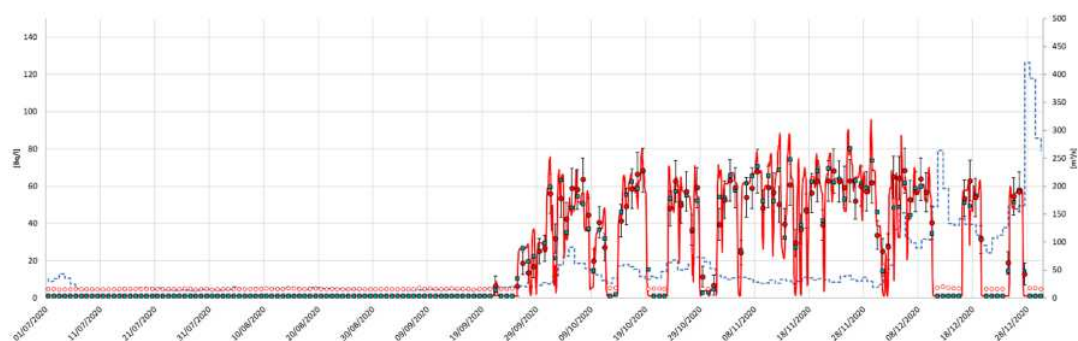
Modélisation SYMBIOSE

- Civaux et bruit de fond
- Civaux et bruit de fond, moyenne journalière
- Débit Vienne

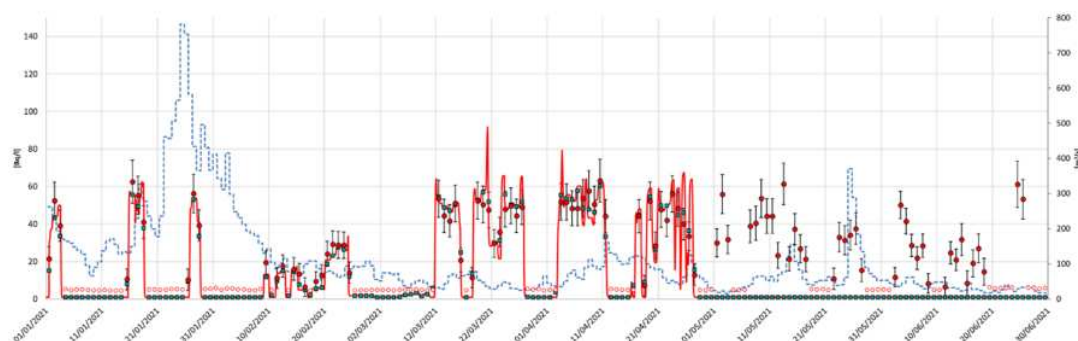
1ER SEMESTRE 2020



2ND SEMESTRE 2020



1ER SEMESTRE 2021



Mesures à la SMP aval (RNM)

- Valeur significative
- Valeur non significative (< au seuil de décision)

Modélisation SYMBIOSE

- Civaux et bruit de fond
- Civaux et bruit de fond, moyenne journalière

--- Débit Vienne

Figure 85 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Civaux, sur la période de janvier 2017 à avril 2021

8.4 CALAGE DU CODE CASTEAUR2D

Le code CASTEAUR2D est calibré entre les ouvrages de rejet et les SMP aval des CNPE en fonction des données de traçages liquides réalisés à différentes conditions de débit. Pour chaque traçage, cette calibration consiste à suivre les trois étapes ci-dessous pour ajuster les paramètres hydrographique et hydraulique de façon à réduire les écarts entre les activités volumiques modélisées et mesurées.

1. Détermination du maillage du cours d'eau à partir d'images satellites de la zone d'étude prises à des dates qui correspondent à des conditions de débit les plus proches possibles de celles des traçages.
2. Paramétrage des sources de débit et de traceur.
3. Calibration des paramètres de diffusion par réduction des écarts modèle/mesures sur l'ensemble du domaine.

Pour les CNPE de Belleville, Dampierre, Saint Laurent et Civaux, les paragraphes suivants présentent :

- Les données de traçages liquides disponibles.
- Les images satellites disponibles à différentes dates dans l'application Google Earth et les conditions de débit qui leurs correspondent par recoupement entre les dates de prise de vue et les chroniques de débit extraites du site HydroPortail (hydro.eaufrance.fr) aux stations hydrographiques les plus proches de chaque zone d'étude.
- Pour chaque traçage :
 - Les conditions de débit.
 - Les conditions de rejet.
 - Les données du traçage (sections de mesure et profils d'activités volumiques).
 - Le maillage du domaine d'étude.
 - Les paramètres de diffusion calibrés.
- Une synthèse qui regroupe les largeurs des biefs, les paramètres de diffusion et les débits.

Pour le CNPE de Chinon, les travaux de calibration sont disponibles dans [1].

— CNPE de Belleville sur Loire

Plusieurs traçages ont été réalisés pour étudier la dispersion des effluents du CNPE de Belleville (Tableau 7). Le CEA en a produit 6 entre 1985 et 1992 et EDF en a réalisé 3 entre 1998 et 1999 et 4 entre 2014 et 2017 [6].

Tableau 7 : Belleville - Historique des traçages avant 2000

Réalisation	Date des campagnes	Débit en Loire	Zones étudiées	Distance au rejet (km)
CEA	10 mai 1985 [1]	1330 m³/s	Bonny Ousson-sur-Loire Briare	4,5 km 10 km 17 km
	10 septembre 1985 [1]	70 m³/s	Pont de Bonny Iles de Bonny Ousson-sur-Loire Les Mantelots	4,7 km 7,7 km 9,7 km 12 km
	4 février 1987 [1]	350 m³/s	Les Mantelots	12 km
	22 mars 1987 [1]	310 m³/s		
	30 juin 1989 [2]	81 m³/s	Les Mantelots	12 km
	16 juin 1992 [2]	1100 m³/s		
EDF-DTG	13 mai 1998	400 m³/s	Bonny	4,5 km
	18 septembre 1998	95 m³/s	Ousson-sur-Loire Les Mantelots	10 km 12 km
	20 février 1999	1930 m³/s	Pont de Châtillon	13 km

Compte tenu du caractère évolutif du lit de la Loire au gré des crues, la calibration de CASTEAUR2D a été réalisée avec les traçages les plus récents effectués par EDF entre 2014 et 2017. Ces traçages ont suivi des rejets liquides de tritium du CNPE pour deux conditions d'étiage et deux conditions de module. Par la suite, ces différents traçages sont notés Etiage I, Etiage II, Module I et Module II (Tableau 8).

Tableau 8 : Belleville - Traçages EDF de 2014 à 2017

	Etiage I	Module I	Etiage II	Module II
Date	24/06/2014	11/12/2014	06/10/2016	07/04/2017
Débit moyen Loire (m³/s)	72	329	68	316
Début rejet	19/06 – 16h36	9/12 – 18h08	5/10 – 00h27	05/04 – 19h32
Fin rejet	24/06 – 12h58	12/12 – 14h30	11/10 – 11h29	07/04 – 12h48
Activité réservoir (Bq/L)	$2 \cdot 10^6 \pm 7.4 \cdot 10^4$	$5.5 \cdot 10^5 \pm 2.1 \cdot 10^4$	$5.6 \cdot 10^6 \pm 2.1 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^6 \pm 5.7 \cdot 10^4$
Débit moyen rejet KER (m³/h)	3.2	9.4	0.94	17.3
Activité ajoutée (Bq/L)	24.7 ± 0.9	4.4 ± 0.2	21.7 ± 0.8	22.5 ± 0.9
Activité amont (Bq/L)	< 2.5	< 2.2	< 2.2	< 2.4
Activité mélange Loire (Bq/L)	21.3 – 28.1	2.0 – 6.8	18.7 – 24.7	19.3 – 25.8
Activité SMP aval (Bq/L)	21 – 26 entre 10h et 17h le 24/06/2014	8 – 14 entre 8h et 14h le 11/12/2014	17 – 20 entre 10h et 20h le 06/10/2016	35 – 38 entre 9h et 17h le 07/04/2017

Images satellites et conditions de débit

L'application Google Earth propose 8 dates de prise de vue pour la zone comprise entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval du CNPE de Belleville sur Loire. Le Tableau 9 regroupe ces différentes dates avec les débits moyens journaliers de la Loire enregistrés à la station HYDRO de Gien (15 km en aval de la SMP) et classés par ordre croissant.

Tableau 9 : Belleville - Images du linéaire et débits de la Loire à Gien

Dates	Débit de la Loire à Gien (HydroPortail) (m³/s)	Image SMP	Images Google Earth	Débit de la Loire à Gien (HydroPortail) (m³/s)	Image SMP
11/09/2015	54.1		02/09/2018	56.6	
27/06/2011	58.3		25/06/2011	59.3	
27/07/2002	74.6		19/07/2010	123	

31/12/2006

171



18/09/2002

186



Traçage Etiage I

Pour ce traçage, le rejet de tritium a été réalisé par la seule galerie côté rive gauche de l'ouvrage de rejet, composée de 14 buses. Le rejet a débuté le 19 juin 2014 à 19h36 et s'est terminé le 24 juin 2014 à 12h58. L'activité volumique de tritium de la bêche était de $2 \cdot 10^6 (\pm 7.4 \cdot 10^4)$ Bq/L, le débit volumique moyen de rejet était de $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$ et le débit d'activité de $1.7 \cdot 10^6 \text{ Bq/s}$. Avec le débit moyen de la Loire, estimé à $72 \text{ m}^3/\text{s}$, l'activité ajoutée au bon mélange était donc de $27.7 (\pm 0.9) \text{ Bq/L}$.

Les activités volumiques mesurées à la SMP aval le 24 juin 2014 entre 10 et 17 heures ont varié entre 21 et 26 Bq/L et l'activité volumique en amont du rejet était $< 2.5 \text{ Bq/L}$.

Au cinquième jour qui a suivi le début du rejet, le traçage a investigué des transects à 6 sections (Tableau 10 et Figure 86) entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval.

Tableau 10 : Belleville - Etiage I : Transects du traçage

6 SECTIONS	Distance rejet (km)
6. Mantelots (SMP)	11.8
5. Ousson	11.5
4. Îles de Bonny	6.4
3. Pont de Bonny	4.8
2. Maimbray	2.8
1. Aval rejet	0.1



Figure 86 : Belleville - Etiage I : Transects du traçage

Maillage

Le maillage est construit à partir de l'image Google Earth du 27 juillet 2002 qui, avec un débit de $74 \text{ m}^3/\text{s}$, correspond au débit le plus proche de celui du traçage. Il est composé de 36 biefs ordonnés de l'amont vers l'aval et de la berge droite vers la berge gauche (Figure 87).



Figure 87 : Belleville - Etiage I : Vue générale du maillage

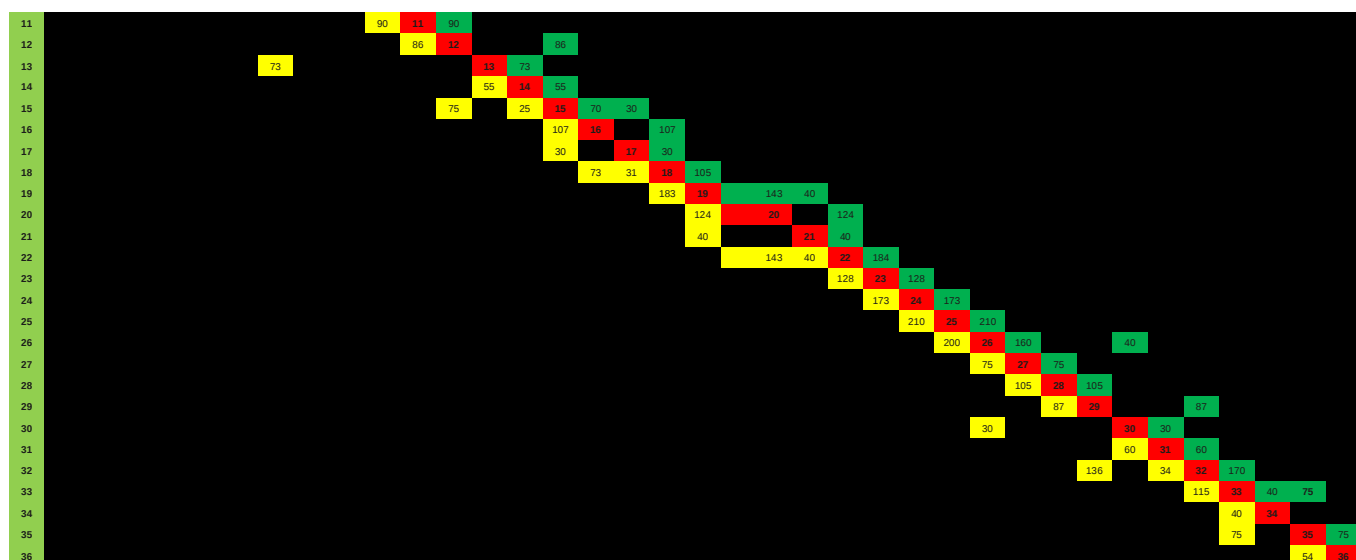
La pente ($3 \cdot 10^{-4} \text{ m.m}^{-1}$) et le coefficient de Strickler ($27 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) sont fixés de façon uniforme à tous les biefs. Les largeurs sont déduites de l'image satellite sélectionnée et les paramètres de diffusion (Cy) ont été calibrés à 0.6 et de façon uniforme à tous les biefs à partir du traçage. Ces paramètres (Tableau 11) et la matrice des connectivités (Tableau 12) sont présentés ci-après.

Tableau 11 : Belleville - Etiage I : Paramètres des mailles

ID	Nom	PARAMETRES DES BIEFS				Largeur (m)
		Longueur (m)	Pente (m/m)	Strickler ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)	Cy (-)	
1	Bief 1	156	3.00E-04	27	0.6	110
2	Bief 2	152	3.00E-04	27	0.6	90
3	Bief 3	104	3.00E-04	27	0.6	66
4	Bief 4	464	3.00E-04	27	0.6	130
5	Bief 5	680	3.00E-04	27	0.6	50
6	Bief 6	200	3.00E-04	27	0.6	180
7	Bief 7	210	3.00E-04	27	0.6	200
8	Bief 8	888	3.00E-04	27	0.6	105
9	Bief 9	83	3.00E-04	27	0.6	90
10	Bief 10	806	3.00E-04	27	0.6	90
11	Bief 11	870	3.00E-04	27	0.6	90
12	Bief 12	760	3.00E-04	27	0.6	86
13	Bief 13	1085	3.00E-04	27	0.6	73
14	Bief 14	2320	3.00E-04	27	0.6	55
15	Bief 15	1854	3.00E-04	27	0.6	100
16	Bief 16	300	3.00E-04	27	0.6	107
17	Bief 17	300	3.00E-04	27	0.6	30
18	Bief 18	456	3.00E-04	27	0.6	105
19	Bief 19	393	3.00E-04	27	0.6	183
20	Bief 20	569	3.00E-04	27	0.6	124
21	Bief 21	580	3.00E-04	27	0.6	40
22	Bief 22	172	3.00E-04	27	0.6	184
23	Bief 23	480	3.00E-04	27	0.6	128
24	Bief 24	560	3.00E-04	27	0.6	173
25	Bief 25	457	3.00E-04	27	0.6	210
26	Bief 26	630	3.00E-04	27	0.6	200
27	Bief 27	266	3.00E-04	27	0.6	75
28	Bief 28	392	3.00E-04	27	0.6	105
29	Bief 29	245	3.00E-04	27	0.6	87
30	Bief 30	113	3.00E-04	27	0.6	30
31	Bief 31	868	3.00E-04	27	0.6	60
32	Bief 32	120	3.00E-04	27	0.6	170
33	Bief 33	130	3.00E-04	27	0.6	115
34	Bief 34	150	3.00E-04	27	0.6	40
35	Bief 35	53	3.00E-04	27	0.6	75
36	Bief 36	113	3.00E-04	27	0.6	54

Tableau 12 : Belleville - Etiage I : Matrice de connectivité

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	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	1	95			15																															
2	90	2	90																																	
3		64	3	95																																
4			127	4																																
5	50		97		8	50																														
6			156	23	8	180																														
7					200	7	150							50																						
8						105	8	195																												
9							90	9	90																											
10								90	10	90																										



Paramétrage hydraulique

A l'étiage, le débit arrive essentiellement par le bief 1 en raison du dénoyage du seuil qui traverse la Loire au niveau de l'ouvrage de rejet (Figure 88). Faute de mesures dans le panache au niveau du transect aval le plus proche du rejet, la répartition du débit entrant est calquée sur celle obtenue pour le traçage Etiage II en attribuant la quasi-totalité du débit entrant au bief 1 et des apports supplémentaires résiduels aux biefs 3 et 4 (Tableau 13).



Figure 88 : Belleville - Etiage I : Maillage au rejet

Tableau 13 : Belleville - Etiage I : Débits entrants

ID	Nom	Affluent droit (m³/s)	Liaison entrante (m³/s)	Affluent gauche (m³/s)
1	Bief 1	0	70	0
2	Bief 2	0	0	0
3	Bief 3	1	0	0
4	Bief 4	1	0	0

Paramétrage des sources

Le bruit de fond est fixé à 2.2 Bq/L à l'entrée du bief 1 et aux affluents droits des biefs 3 et 4 et les 14 buses de rejet sont positionnées à l'entrée du bief 1 en fonction de leur distance à la limite droite de ce bief.

Au premier transect en aval du rejet aucune mesure n'a été réalisée dans le panache situé en rive gauche (Figure 89), de sorte que ce traçage ne permet pas d'ajuster la répartition du flux de rejet entre les différentes buses. En conséquence, cette répartition est calquée sur celle du traçage Etiage II en se limitant à la clarinette située vers la rive gauche qui était la seule en fonctionnement lors de ce traçage (Figure 90).

Belleville - Etiage I
100 m Aval Rejet

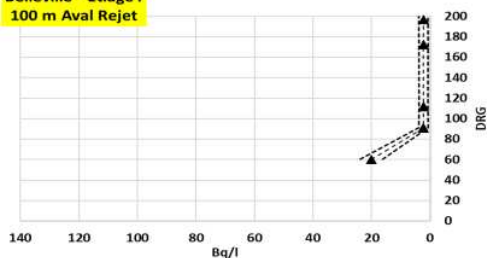


Figure 89 : Belleville - Etiage I : Transect 100 m aval rejet

(Triangles noirs : mesures ; Pointillés : incertitudes)

Etiage I - Flux de tritium aux buses de rejet

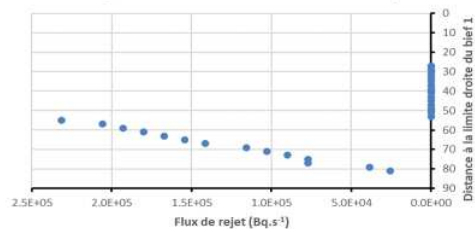


Figure 90 : Belleville - Etiage I : Répartition du flux de rejet aux buses de l'ouvrage

Comparaison modèle/mesures

La Figure 91 présente la comparaison du modèle aux mesures du traçage avec la distance à la rive gauche (DRG, en m) en ordonnée et les activités volumiques en abscisse.

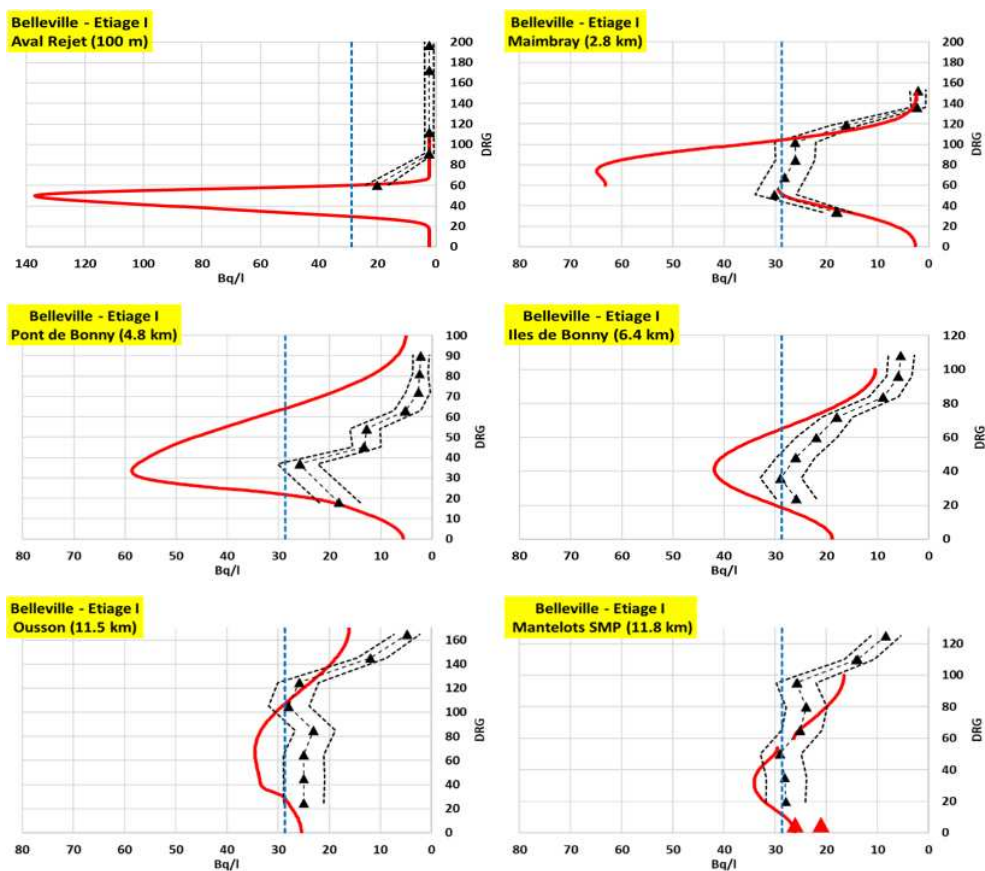


Figure 91 : Belleville - Etiage I : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium

(Petits triangles noirs : mesures du traçage ; Grands triangles rouge : mesures SMP aval ; Pointillés noirs : incertitudes ; courbe rouge : modèle ; Pointillés bleus : activité au mélange homogène)

En aval proche du rejet, le modèle montre qu'aucune mesure n'a été réalisée dans le panache qui reste localisé près de la rive gauche. A Maimbray, Pont de Bonny et Iles de Bonny les positionnements des pics d'activités volumiques modélisées s'accordent avec les mesures mais leurs niveaux sont nettement supérieurs en notant toutefois que les mesures sont incohérentes avec le bilan de masse et l'activité volumique attendue au mélange. Le traçage ayant été réalisé 5 jours après le début du rejet, ces écarts pourraient être imputables à un débit de la Loire supérieur aux 72 m³/s ou à un débit de rejet plus faible que celui annoncé.

Au niveau de la SMP aval le profil transversal n'est pas parfaitement homogène mais proche du mélange homogène et l'activité volumique modélisée en rive gauche est bien représentative des activités volumiques mesurées à partir du prélèvement de la SMP aval (grands triangles rouges).

Traçage Etiage II

Contrairement au traçage Etiage I, ce nouveau traçage à l'étiage a suivi un rejet effectué à partir des deux galeries de l'ouvrage de rejet. Le rejet a débuté le 5 octobre 2016 à 00h27 et s'est terminé le 11 octobre 2016 à 11h29. L'activité volumique de tritium de la bêche était de $5.6 \cdot 10^6$ ($\pm 2.1 \cdot 10^5$) Bq/L pour un débit volumique moyen de rejet de $0.94 \text{ m}^3/\text{h}$, ce qui conduit à un débit d'activité de $1.46 \cdot 10^6 \text{ Bq/s}$.

Avec un débit moyen de la Loire estimé à $68 \text{ m}^3/\text{s}$, l'activité ajoutée était de 21.5 Bq/L au mélange homogène.

Les activités volumiques mesurées à la SMP aval le 6 octobre 2016 entre 10 et 20 heures ont varié entre 17 et 20 Bq/L et l'activité volumique en amont du rejet était sous le seuil de décision ($< 2.2 \text{ Bq/L}$).

Entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval, le traçage a investigué 6 transects (Tableau 14 et Figure 92) au lendemain du début du rejet.

Tableau 14 : Belleville - Etiage II : Transects du traçage

6 SECTIONS	Distance rejet (km)
6. Mantelots (SMP)	11.8
5. Iles Gascon	10
4. Îles de Bonny	6.4
3. Pont de Bonny	4.8
2. Maimbray	2.8
1. Aval rejet	0.1



Figure 92 : Belleville - Etiage II : Transects du traçage

Maillage

Le maillage et son paramétrage sont identiques à ceux utilisés pour le traçage Etiage I (Figure 87 et Tableau 12).

Paramétrage hydraulique

Le paramétrage de la répartition du débit à l'entrée du domaine est donné par la calibration du modèle au niveau du premier transect mesuré à 100 m en aval du rejet. Il ressort que le débit entrant est essentiellement localisé à l'entrée du bief 1 en raison du dénoyage du seuil et que des apports résiduels sont attribués aux biefs 3 et 4 (Tableau 15).

Tableau 15 : Belleville - Etiage II : Débits entrants

ID	Nom	Affluent droit (m^3/s)	Liaison entrante (m^3/s)	Affluent gauche (m^3/s)
1	Bief 1	0	66	0
2	Bief 2	0	0	0
3	Bief 3	1	0	0
4	Bief 4	1	0	0

Paramétrage des sources

Le bruit de fond est fixé à 2.2 Bq/L à l'entrée du bief 1 et aux affluents droits des biefs 3 et 4. Les 28 buses de rejet sont positionnées à l'entrée du bief 1 par rapport à la berge droite (Figure 94). La répartition du flux de rejet de tritium entre ces

buses est ajustée en confrontant le modèle aux mesures au premier transect, 100 m en aval du rejet. La Figure 93 présente les comparaisons modèle/mesures obtenues à ce transect avec une répartition homogène et la répartition calibrée (Figure 94).

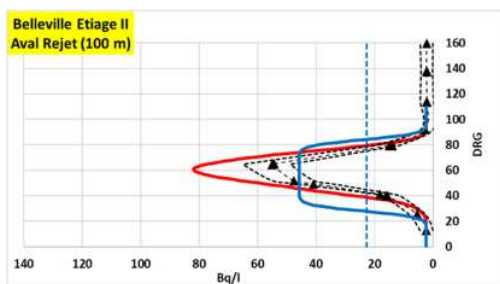


Figure 93 : Belleville - Etiage II : activités volumiques pour les flux calibrés vs homogènes aux buses, à 100 m en aval du rejet

Courbe rouge : calibré ; courbe bleue : homogène ; triangles noirs : mesures ; Pointillés noirs : incertitude ; tirets bleus : activité volumique attendue au mélange

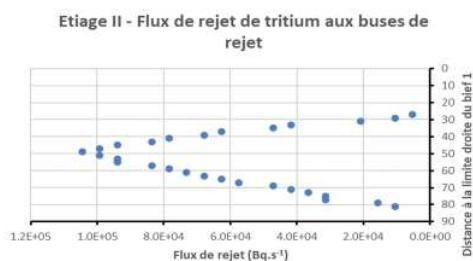


Figure 94 : Belleville - Etiage II : Répartition calibrée des flux de rejet aux buses

Comparaison modèle/mesures

La Figure 95 présente la comparaison du modèle aux mesures du traçage avec la distance à la rive gauche (DRG, en m) en ordonnée et les activités volumiques en abscisse.

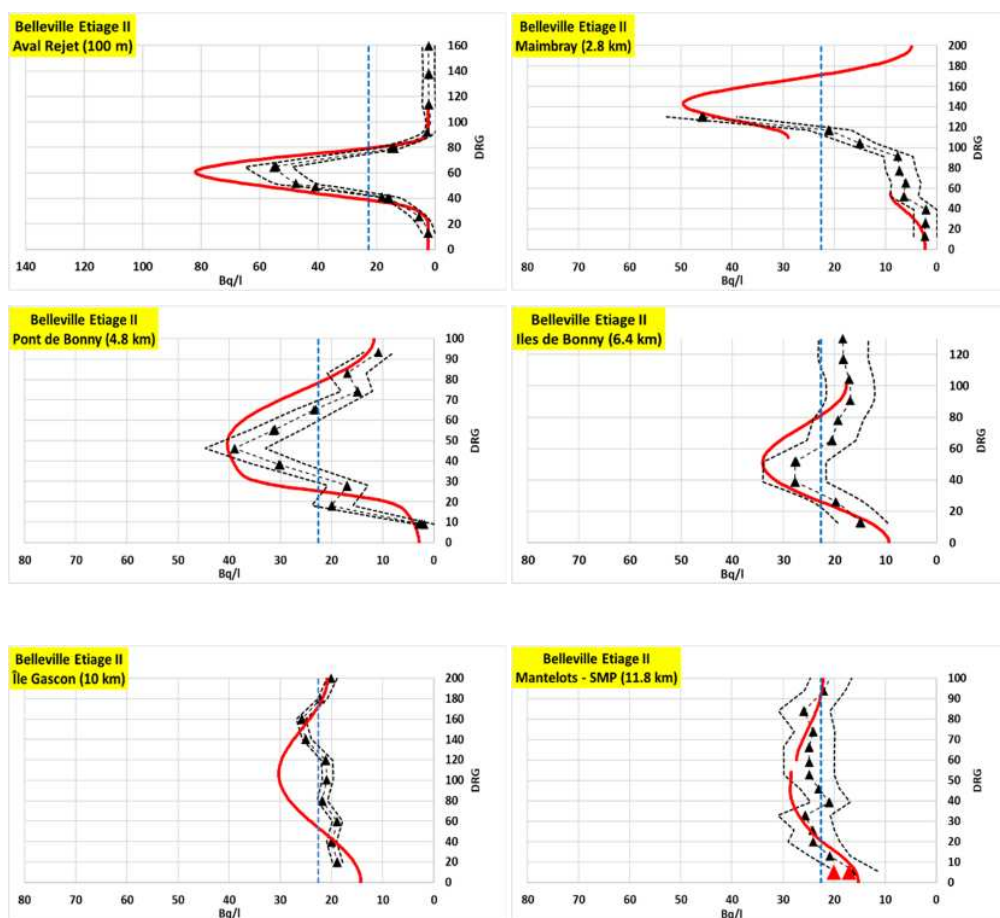


Figure 95 : Belleville - Etiage II : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium

(Triangles noirs : mesures du traçage ; Grands triangles rouge : mesures SMP aval ; Pointillés noirs : incertitudes ; courbe rouge : modèle ; Pointillés bleus : activité au mélange homogène)

A Maimbray, Pont de Bonny et îles de Bonny les profils d'activités volumiques modélisés sont proches des mesures. On observe un décalage à l'île Gascon où les mesures indiquent un mélange homogène alors que le modèle maintient un maximum au centre de la veine.

Au niveau de la SMP aval, la tendance observée avec Etiage I est confirmée à savoir que, à l'étiage, le profil transversal n'est pas parfaitement homogène mais proche du mélange et l'activité volumique modélisée en rive gauche est similaire à celles mesurées à la SMP (grands triangles rouges).

Traçage Module I

Comme pour Etiage I, le rejet de tritium suivi par ce traçage a été réalisé uniquement par les 14 buses de la galerie côté rive gauche de l'ouvrage de rejet.

Le rejet s'est déroulé sur trois jours du 9 décembre 2014 à 18h08 au 12 décembre 2014 à 14h30. L'activité volumique de tritium de la bêche était de $5.5 \cdot 10^5 (\pm 2.1 \cdot 10^4)$ Bq/L. Pour un débit volumique moyen de rejet de $9.4 \text{ m}^3/\text{h}$, le débit d'activité était de $1.4 \cdot 10^6 \text{ Bq/s}$.

Pour un débit moyen de la Loire à $329 \text{ m}^3/\text{s}$, l'activité ajoutée attendue était de $4.4 (\pm 0.2) \text{ Bq/L}$ au bon mélange.

Les activités volumiques mesurées à la SMP aval le 11 décembre 2014 entre 8 et 14 heures ont varié entre 8 et 14 Bq/L alors que l'activité volumique moyenne en amont du rejet était sous le seuil de décision ($< 2.2 \text{ Bq/L}$).

Entre l'ouvrage de rejet et la SMP Aval, le traçage a investigué 5 transects (Tableau 14 et Figure 96) au cinquième jour qui a suivi le début du rejet.

Tableau 16 : Belleville - Module I : Transects du traçage

6 SECTIONS	Distance rejet (km)
5. Mantelots (SMP)	11.8
4. Îles de Bonny	6.4
3. Pont de Bonny	4.8
2. Maimbray	2.8
1. Aval rejet	0.1

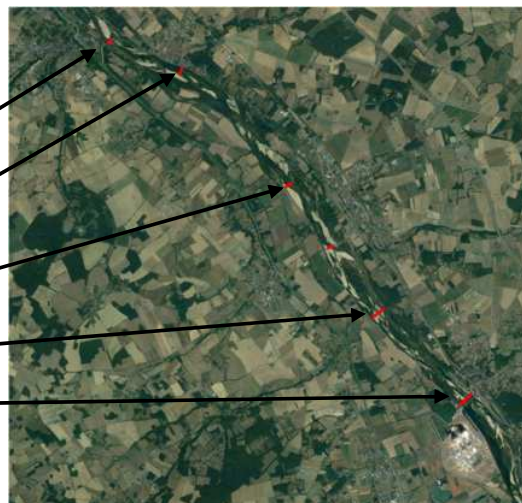


Figure 96 : Belleville - Module I : Transects du traçage

Maillage

Le maillage est identique à celui des traçages à l'étiage (Figure 87 ; Tableau 11 ; Tableau 12).

Paramétrage hydraulique

Par rapport aux conditions d'étiage, le débit à l'entrée du domaine reste majoritairement positionné en rive gauche mais des contributions non négligeables sont réparties sur l'ensemble de la section en raison du noyage du seuil (Figure 97). Comme pour la campagne Etiage I, les mesures réalisées au transect aval le plus proche n'ont pas capté le panache (Figure 99) et la répartition du débit (Tableau 17) est calibrée à partir des activités volumiques mesurées au transect aval le plus proche qui est celui de Maimbray à 2.8 km.



Figure 97 : Belleville - Module I : Maillage à l'ouvrage de rejet

Tableau 17 : Belleville - Module I : Débits entrants

ID	Nom	Affluent droit (m³/s)	Liaison entrante (m³/s)	Affluent gauche (m³/s)
1	Bief 1	0	165	0
2	Bief 2	0	0	0
3	Bief 3	82	0	0
4	Bief 4	82	0	0

Paramétrage des sources

Le bruit de fond est fixé à 2.2 Bq/L à l'entrée du bief 1 et aux affluents droits des biefs 3 et 4. Les 14 buses de rejet de la première galerie sont positionnées à l'entrée du bief 1 de façon identique à Etiage I (Figure 94) et la répartition du flux entre les différentes buses est également calquée sur celle du traçage Etiage II pour la seule galerie située du côté de la rive gauche et au prorata du débit de rejet (Figure 98).

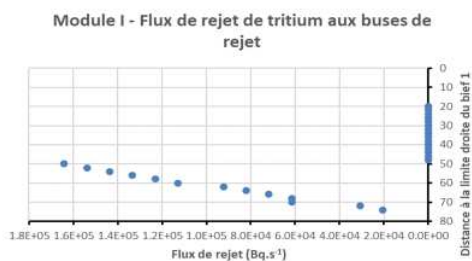


Figure 98 : Belleville - Module I : Répartition du flux de rejet aux buses

Comparaison modèle/mesures

La Figure 99 présente les comparaisons modèle/mesures aux différents transects du traçage avec la distance à la rive gauche (DRG, en m) en ordonnée et les activités volumiques en abscisse.

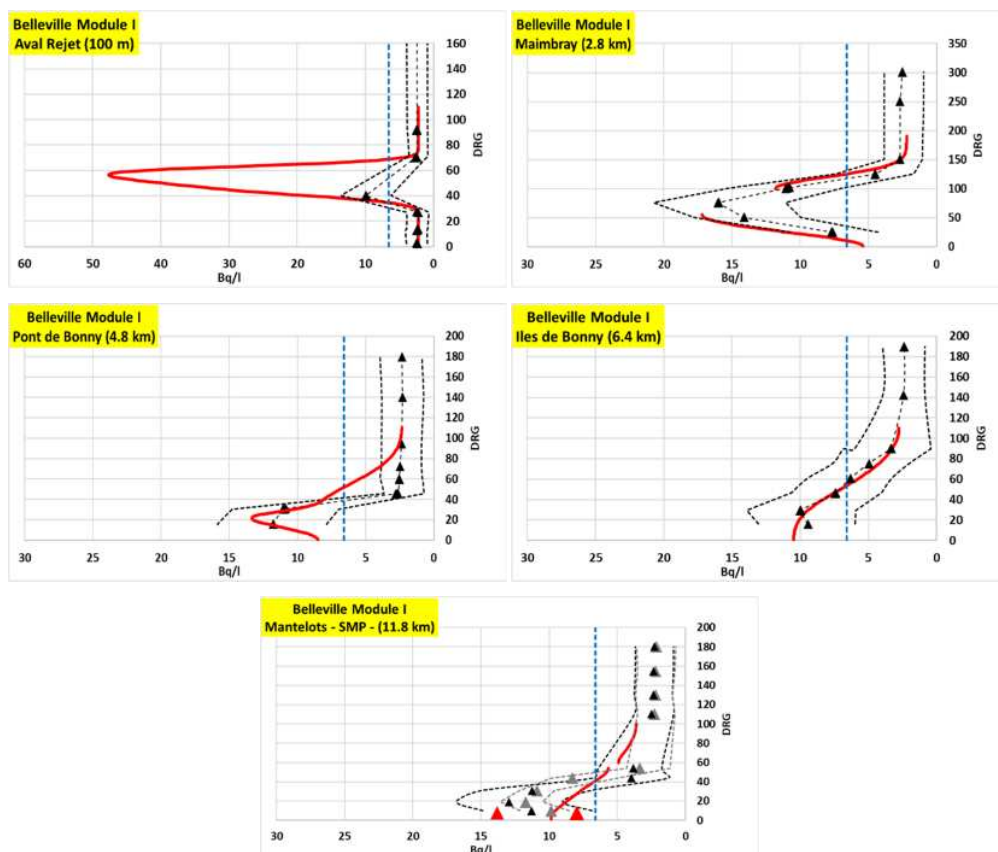


Figure 99 : Belleville - Module I : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium

(Triangles noirs : mesures du traçage en surface ; Triangles gris : mesures du traçage à mi-profondeur ; Triangles rouges : mesures à la SMP aval ; Pointillés noirs : incertitudes ; courbe rouge : modèle ; Pointillés bleus : Activité au mélange)

Comme pour le traçage Etiage I, la comparaison modèle/mesures montre que le panache n'a pas été capté par les mesures à la première section. A la SMP aval, le graphique présente les résultats dans le bras situé à gauche de la digue centrale où se situe la SMP aval. Le modèle est en accord avec les mesures de la surveillance (grands triangles rouges) mais donne une valeur maximale en rive droite inférieure à celle du traçage. On relèvera que cette dernière est supérieure à la valeur maximale mesurée à l'île de Bonny, plusieurs kilomètres en amont.

Traçage Module II

Ce nouveau traçage au module a suivi un rejet effectué à partir des deux galeries de l'ouvrage de rejet. Le rejet a débuté le 5 avril 2017 à 19h32 et s'est terminé le 7 avril 2017 à 12h48. L'activité volumique de tritium de la bêche était de $1.5 \cdot 10^6 (\pm 5.7^E4)$ Bq/L, le débit volumique moyen de rejet de $17.3 \text{ m}^3/\text{h}$ et le débit d'activité de $7.21 \cdot 10^6 \text{ Bq/s}$.

Avec un débit moyen de la Loire de $316 \text{ m}^3/\text{s}$, l'activité ajoutée au bon mélange était de 22.8 Bq/L .

L'activité volumique en amont du rejet était sous le seuil de décision ($< 2.4 \text{ Bq/L}$) et les activités volumiques mesurées à la SMP aval le 7 avril 2017 entre 9 et 17 heures ont varié entre 35 et 38 Bq/L.

Entre l'ouvrage de rejet et la SMP Aval, le traçage a investigué 4 transects (Tableau 18 et Figure 92) réalisés 2 jours après le début du rejet.

Tableau 18 : Belleville - Module II : Transects du traçage

Transects	Distance rejet (km)
4. Mantelots (SMP)	11.8
3. Îles de Bonny	6.4
2. Pont de Bonny	4.8
1. Maimbray	2.8



Figure 100 : Belleville - Module II : Transects du traçage

Maillage

Le maillage est identique à celui du traçage Module I.

Paramétrage hydraulique

Faute de transect en aval proche du rejet, le paramétrage de la répartition du débit à l'entrée du domaine est calé à partir des activités volumiques mesurées au transect de Mambray à 2.8 km en aval. De façon similaire au traçage Module I, le débit à l'entrée du domaine est majoritairement positionné en rive gauche et des contributions non négligeables sont réparties sur l'ensemble de la section en raison du noyage du seuil (Tableau 19).

Tableau 19 : Belleville - Module II : Débits entrants

ID	Nom	Affluent droit (m³/s)	Liaison entrante (m³/s)	Affluent gauche (m³/s)
1	Bief 1	0	160	0
2	Bief 2	0	0	0
3	Bief 3	78	0	0
4	Bief 4	78	0	0

Paramétrage des sources

Le bruit de fond est fixé à 2.2 Bq/L à l'entrée du bief 1 et aux affluents droits des biefs 3 et 4. Les 28 buses de rejet sont positionnées à l'entrée du bief 1 par rapport à leur distance à la limite droite du bief et la répartition du flux de rejet de tritium entre ces buses est identique à celle du traçage Etiage II au prorata du débit de rejet (Figure 101).

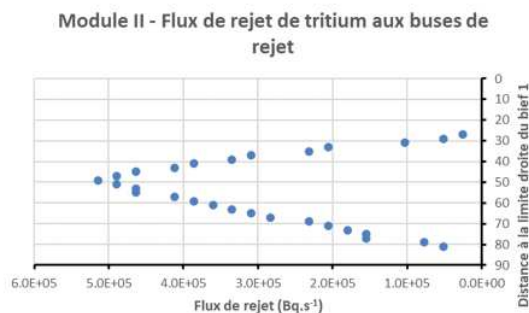


Figure 101 : Belleville - Module II : Répartition calibrée des flux de rejet aux buses

Comparaison modèle/mesures

La Figure 102 présente la comparaison du modèle aux mesures du traçage avec la distance à la rive gauche (DRG) en ordonnée et les activités volumiques en abscisse.

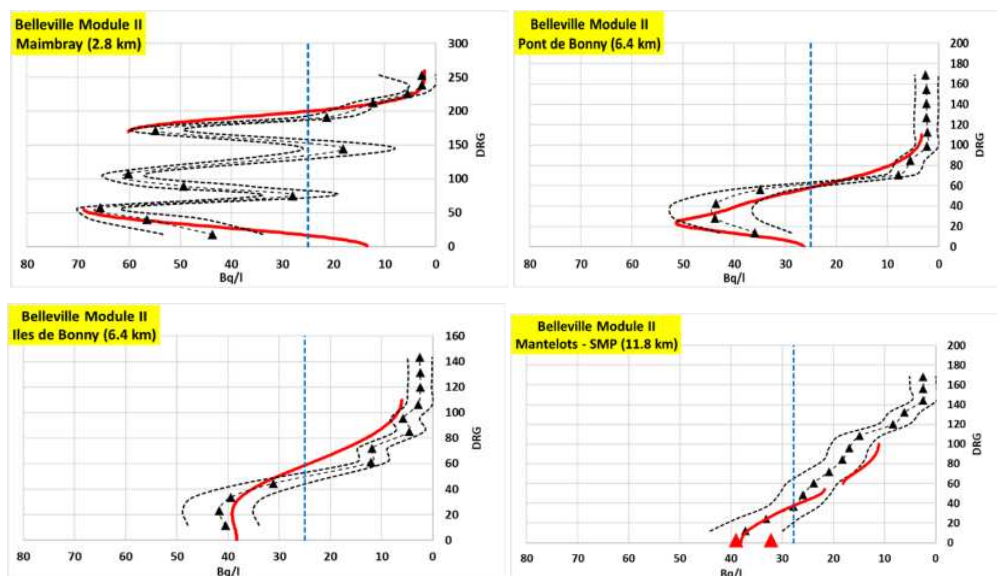


Figure 102 : Belleville - Module II : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium

(Triangles noirs : mesures du traçage ; Triangles rouges : mesure à la SMP aval ; Pointillés noirs : incertitudes ; courbe rouge : modèle ; Pointillés bleus : Activité au mélange)

La calibration du modèle permet d'obtenir un bon accord entre les distributions latérales des activités volumiques modélisées et mesurées. A Maimbray, les écarts du modèle avec les mesures s'expliquent par le maillage qui n'a pas détaillé les petits bras entre les îlots de sable (Figure 103).



Figure 103 : Belleville - Section de Maimbray et ses îlots de sable

Au niveau de la SMP aval, le profil n'est pas homogène et les valeurs maximales sont situées en rive gauche au niveau du prélèvement. La calibration du modèle donne un bon accord entre les activités volumiques modélisées et celles du traçage et de la surveillance EDF (grands triangles rouges).

CNPE de Dampierre en Burly

La SMP aval a été positionnée en fonction des traçages du CEA réalisés en 1976 et 1978 pour déterminer la distance de mélange complet en aval de l'ouvrage de rejet et afin de caractériser l'alimentation des nappes alluviales et karstiques par les eaux de la Loire [7]. Plus récemment, en 2012 et 2013, EDF a réalisé 2 traçages [7] en suivant la propagation vers l'aval de deux rejets de tritium. Le premier a été réalisé en août 2012 pour des conditions d'étiage avec un débit de la Loire à 70 m³/s et le second en décembre 2013 pour des conditions de module avec un débit de la Loire à 300 m³/s.

Compte tenu de la période éloignée des traçages du CEA et du caractère évolutif du lit de la Loire, la calibration du code CASTEAUR2D a été réalisée à partir des deux traçages EDF pour lesquels le Tableau 20 résume les principales conditions opératoires.

Tableau 20 : Dampierre : Traçages EDF de 2012 et 2013

Date	21/08/2012	11/12/2013
Débit moyen Loire (m³/s)	68.2	298
Début rejet	20/08 – 18h00	10/12 – 20h40
Fin rejet	23/08 – 10h00	12/12 – 7h30
Activité réservoir (Bq/L)	1.5 10 ⁶	1.8 10 ⁶
Débit moyen rejet KER (m³/h)	5.1	21
Activité ajoutée (Bq/L)	34	31
Activité amont (Bq/L)	3	19
Activité SMP aval (Bq/L)	82	92
	Moyenne entre 9h et 15h le 21/08/2012	Moyenne 7h et 17h le 11/12/2013

Images satellites et conditions de débit

Le logiciel Google Earth propose 12 dates de prises de vue de la zone comprise entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval. Le Tableau 21 recoupe ces différentes dates avec les débits moyens journaliers enregistrés à la station de Gien (8 km en amont de l'ouvrage de rejet) et ordonnés du plus faible au plus fort.

Tableau 21 : Dampierre - Images Google Earth et débits de la Loire

Dates	Débit Loire à Gien (HydroPortail) (m³/s)	Images	Dates	Débit Loire à Gien (HydroPortail) (m³/s)	Images
3/8/2015	52.5		25/06/2011	59.3	
19/07/2010	69.2		27/07/2002	74.6	
14/04/2020	110		17/09/2018	119	
31/12/2006	171		7/04/2017	332	

21/03/2011 414



20/04/2010 571



Comme pour le CNPE de Belleville, ces images illustrent les variations de la morphologie du lit lorsque le débit de la Loire varie entre 52 à 571 m³/s.

Traçage Etiage

Le rejet a débuté le 20 août 2012 à 18h00 et s'est terminé le 23 août 2012 à 10h00. L'activité volumique de tritium de la bache était de 1.5 10⁶ Bq/L, le débit volumique moyen de rejet était de 5.1 m³/h et le débit d'activité de 2.1 10⁶ Bq/s. Avec un débit moyen de la Loire à 68.2 m³/s, l'activité ajoutée au mélange homogène était de 31.1 Bq/L.

L'activité volumique à la SMP aval le 21 août 2012 entre 9h et 15h est restée stable à 84 Bq/L. De même, l'activité volumique mesurée en amont a peu varié autour d'une moyenne à 3 Bq/L.

Entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval, le traçage a investigué 4 transects respectivement nommés section 2, 3, 4 et 5 (Tableau 22 et Figure 104). Ils ont été réalisés le 21 août 2012 entre 8h et 17h, soit 14 heures après le début du rejet.

Tableau 22 : Dampierre - Etiage : Transects du traçage

6 SECTIONS	Distance rejet (km)
5. Port Ouzouer - SMP Aval	5.3
4. La Benne	4.4
3. Lion en Sullas	2.6
2. Aval rejet	0.2



Figure 104 : Dampierre - Etiage : Transects du traçage

Maillage

Le maillage a été construit à partir de l'image Google Earth du 19 juillet 2010 qui, avec un débit de la Loire de 69.2 m³/s, correspond aux conditions les plus proches de celles du traçage. Il est composé de 24 biefs ordonnés de l'amont vers l'aval et de la berge droite vers la berge gauche (Figure 105).

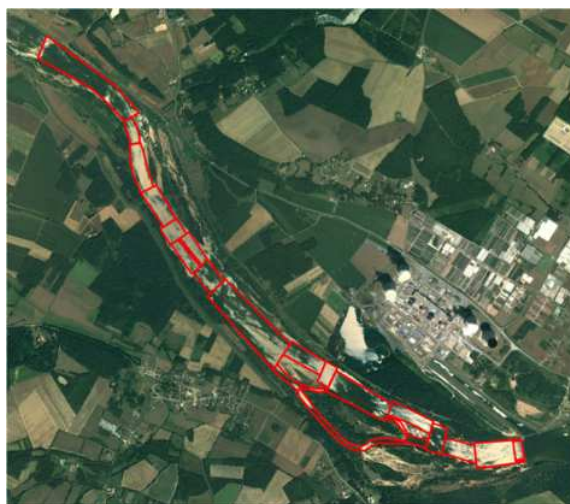


Figure 105 : Dampierre - Etiage : Vue générale du maillage

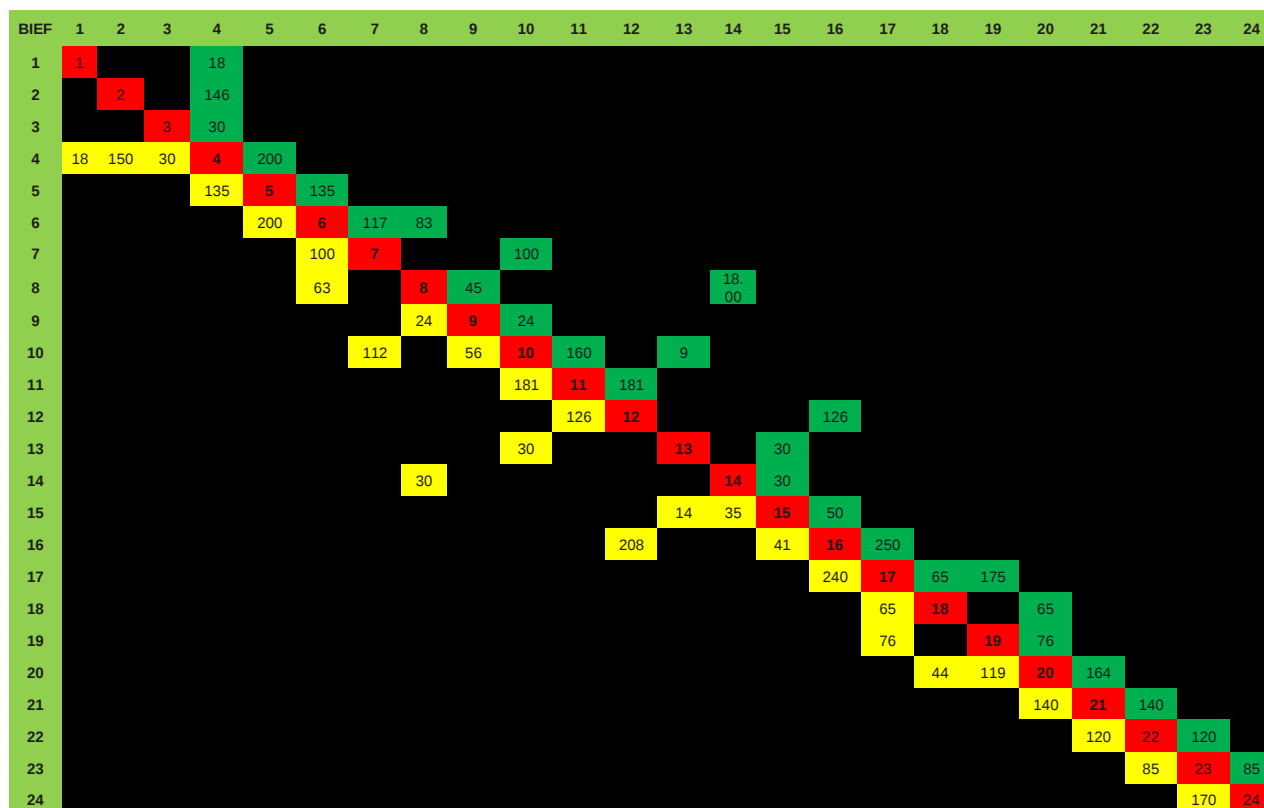
Les paramètres des mailles (Tableau 23) ainsi que la matrice des connectivités (Tableau 24) sont présentés ci-après.

Tableau 23 : Dampierre - Etiage : Paramètres des mailles

ID	Nom	PARAMETRES DES BIEFS				Largeur (m)
		Longueur (m)	Pente (m/m)	Strickler ($m^{1/3}/s$)	Cy (-)	
1	Bief 1	70	0.00074	30	0.6	18
2	Bief 2	70	0.00074	30	0.6	146
3	Bief 3	70	0.00074	30	0.6	30
4	Bief 4	324	0.00074	30	0.6	200
5	Bief 5	267	0.00074	30	0.6	135
6	Bief 6	141	0.00074	30	0.6	200
7	Bief 7	374	0.00074	30	0.6	100
8	Bief 8	176	0.00074	30	0.6	63
9	Bief 9	225	0.00074	30	0.6	24
10	Bief 10	550	0.00074	30	0.6	169
11	Bief 11	105	0.00074	30	0.6	181
12	Bief 12	350	0.00074	30	0.6	126
13	Bief 13	230	0.00074	30	0.6	30
14	Bief 14	1110	0.00074	30	0.6	30
15	Bief 15	270	0.00074	30	0.6	50
16	Bief 16	820	0.00074	30	0.6	250
17	Bief 17	232	0.00074	30	0.6	240
18	Bief 18	300	0.00074	30	0.6	65
19	Bief 19	318	0.00074	30	0.6	76
20	Bief 20	160	0.00074	30	0.6	164
21	Bief 21	363	0.00074	30	0.6	140
22	Bief 22	445	0.00074	30	0.6	120
23	Bief 23	240	0.00074	30	0.6	85
24	Bief 24	1335	0.00074	30	0.6	170

La pente ($7.4 \cdot 10^{-4} m \cdot m^{-1}$), le coefficient de Strickler ($30 m^{1/3}/s$) et le paramètre de diffusion (0.6) sont fixés de façon uniforme à tous les biefs.

Tableau 24 : Dampierre - Etiage : Matrice de connectivité



A chaque bief, les largeurs des liaisons entrantes (termes sous la diagonale) sont déterminées proportionnellement aux contributions de leur débit au débit total du bief.

Paramétrage hydraulique

La section de l'ouvrage de rejet est composée d'une passe à poisson en rive droite, d'un seuil central et d'une seconde passe à poisson en rive gauche. Le maillage représente cette configuration avec trois mailles parallèles (Figure 106). La répartition du débit entrant entre ces trois mailles (Tableau 25) a été obtenue par le calage du modèle aux sections 2 et 3. La répartition des débits aux liaisons sortantes est résolue en mode automatique au-prorata de leurs largeurs.



Figure 106 : Dampierre - Etiage : Maillage au rejet

Tableau 25 : Dampierre - Etiage : Débits entrants

ID	Nom	Affluent droit (m³/s)	Liaison entrante (m³/s)	Affluent gauche (m³/s)
1	Bief 1	0	6	0
2	Bief 2	0	51	0
3	Bief 3	0	10	0

Paramétrage des sources

Le bruit de fond est fixé à 3 Bq/L aux mailles entrantes 1, 2 et 3 et le flux de rejet est réparti de façon homogène entre les 20 buses réparties à l'entrée de la maille 2 comme illustré par la Figure 107.

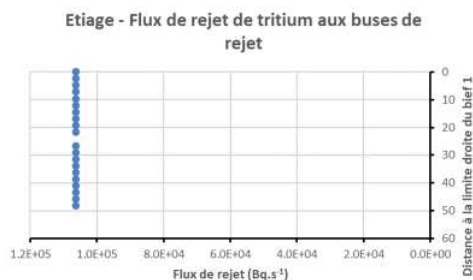


Figure 107 : Dampierre - Etiage : Répartition du flux de rejet aux buses

Comparaison modèle/mesures

La figure suivante présente la comparaison du modèle aux mesures du traçage avec la distance à la rive gauche (DRG, en m) en ordonnée et les activités volumiques en abscisse.

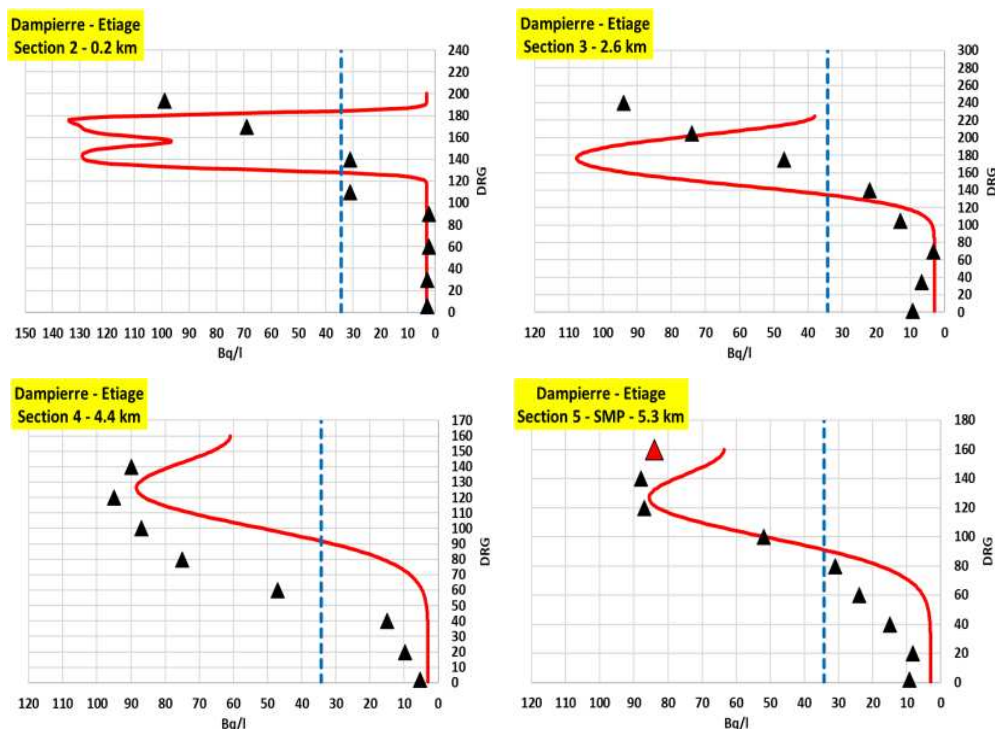


Figure 108 : Dampierre - Etiage : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium

(Triangles noirs : mesures ; Triangle rouge : surveillance à la SMP ; courbe rouge : modèle ; Pointillés bleus : Activité au mélange)

Jusqu'à la SMP aval le panache reste du côté de la rive droite. Le modèle reproduit bien la tendance générale à l'exception de la section 2 où les mesures ne s'accordent pas avec l'hypothèse d'un flux de rejet uniforme entre toutes les buses.

Au niveau de la SMP aval le profil transversal est loin d'être homogène mais le maximum est en rive droite au niveau du point de prélèvement.

Traçage Module

Le rejet a débuté le 10 décembre vers 18h00 et s'est poursuivi pendant 37 heures jusqu'au 12 décembre vers 7h00. L'activité volumique de tritium de la bêche était de $1.8 \cdot 10^6$ Bq/L et le débit volumique de rejet était en moyenne de 5.1 L/s, d'où un débit d'activité de $9.2 \cdot 10^6$ Bq/s. Avec un débit moyen de la Loire à 298 m³/s, l'activité ajoutée au bon mélange était de 31 Bq/L.

L'activité volumique moyenne en amont du rejet a été évaluée à 19 Bq/L et l'activité volumique moyenne à la SMP aval le 11 décembre 2013 entre 7h et 17h est de 92 Bq/L.

Entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval, le traçage a investigué les mêmes sections que pour l'étiage (Tableau 22 et Figure 104).

Maillage

Le maillage reprend celui des conditions d'étiage (Figure 105) avec une augmentation de 20% de la largeur des sections.

Paramétrage hydraulique

La section de l'ouvrage de rejet est composée d'une passe à poisson en rive droite, d'un seuil central et d'une seconde passe à poisson en rive gauche. Le maillage représente cette configuration avec trois mailles parallèles (Figure 106). La répartition du débit entrant entre ces trois mailles (Tableau 26) a été obtenue par le calage du modèle aux sections 2 et 3. La répartition des débits aux liaisons sortantes est résolue en mode automatique au-prorata de leurs largeurs.

Tableau 26 : Dampierre - Etiage : Débits entrants

ID	Nom	Affluent droit (m³/s)	Liaison entrante (m³/s)	Affluent gauche (m³/s)
1	Bief 1	0	6	0
2	Bief 2	0	51	0
3	Bief 3	0	10	0

Paramétrage des sources

Le bruit de fond est fixé à 19 Bq/L aux mailles entrantes 1, 2 et 3 et le flux de rejet est supposé homogène entre les 20 buses réparties à l'entrée de la maille 2 comme illustré par la Figure 109 .

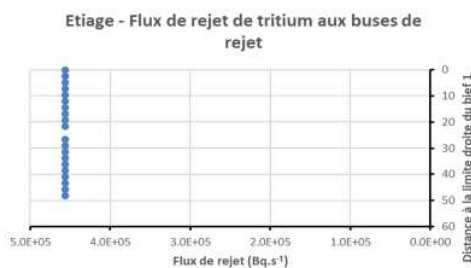


Figure 109 : Dampierre - Module : Répartition du flux de rejet aux buses

Comparaison modèle/mesures

La Figure 110 présente la comparaison du modèle aux mesures du traçage avec la distance à la rive gauche (DRG, en m) en ordonnée et les activités volumiques en abscisse.

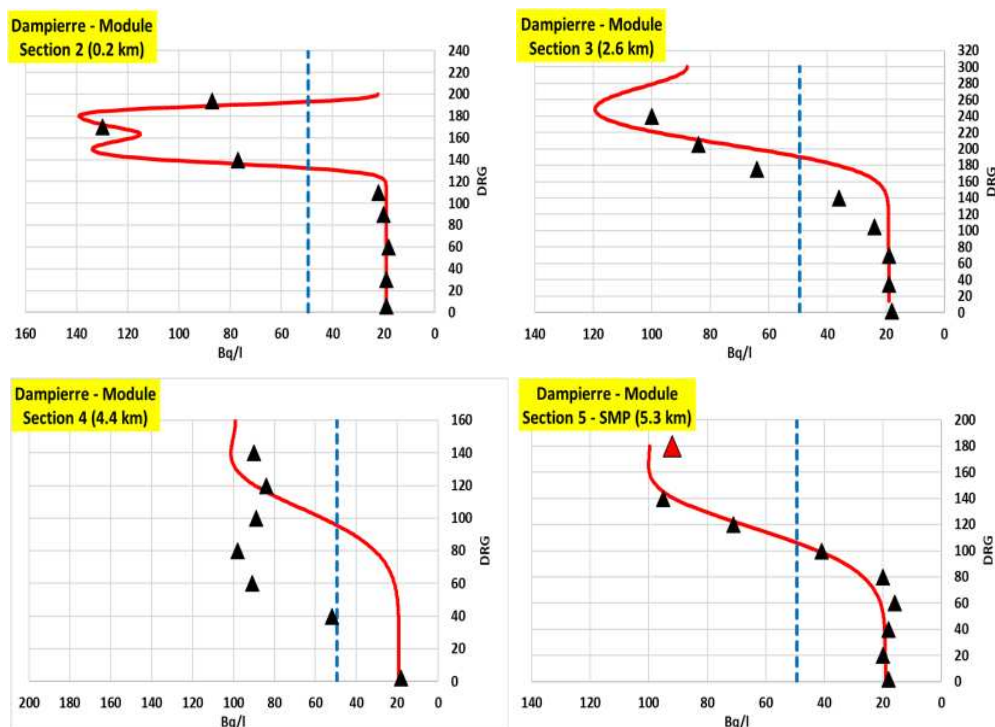


Figure 110 : Dampierre - Module : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium

(Triangles noirs : mesures ; Triangle rouge : surveillance à la SMP ; courbe rouge : modèle ; Pointillés bleus : Activité au mélange)

Entre le rejet et la SMP aval, le comportement du panache au module est similaire au comportement à l'étiage. Au niveau de la SMP aval, le mélange n'est pas homogène, le panache est positionné en rive droite et les prélèvements pour la surveillance s'effectuent dans la zone des activités volumiques les plus fortes. Ainsi, la mesure à la SMP aval est en accord avec les valeurs maximales modélisées et mesurées par le traçage.

CNPE de Saint Laurent des Eaux

La calibration du code CASTEUR2D sur la portion de la Loire comprise entre la clarinette de rejet du CNPE de Saint Laurent des Eaux et sa SMP aval a été effectuée à partir de deux campagnes de traçages liquides au tritium effectuées par EDF. La première en 2011 pour un débit de la Loire de 91 m³/s et la seconde en 2012 pour une condition proche du module à environ 350 m³/s [2]. Les conditions opératoires de ces deux traçages sont rapportées dans le Tableau 27.

Tableau 27 : Saint Laurent - Traçages EDF de 2011 et 2012

Date	08/09/2011	06/12/2012
Débit moyen Loire (m ³ /s)	91	345
Début rejet	08/09 à 5h30	05/12 à 15h00
Fin rejet		07/12 à 10h00
Activité réservoir (Bq/L)	6.6 10 ⁵	3.2 10 ⁶
Débit moyen rejet KER (m ³ /h)	12.5	11.4
Activité ajoutée (Bq/L)	25	29

Activité amont (Bq/L)	32	< 2.5 (SD)
Activité SMP aval (Bq/L)	44 Moyenne entre 10h30 et 21h le 08/09/2012 38 au moment du profil	< 2.5 Moyenne entre 10h et 11h le 06/12/2012

Images satellites et conditions de débit

Le logiciel Google Earth propose 14 dates de prises de vue de la zone comprise entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval. Le Tableau 28 récapitule ces différentes dates avec les débits moyens journaliers enregistrés à la station de Blois (environs 25 km en amont de l'ouvrage de rejet) et ordonnés du plus faible au plus fort.

Tableau 28 : Saint Laurent : Images Google Earth et débits de la Loire

Dates	Débit Loire à Blois (HydroPortail) (m³/s)	Images	Dates	Débit Loire à Blois (HydroPortail) (m³/s)	Images
30/06/2011	54.5		6/08/2015	60	
4/10/2018	74.2		6/10/2018	76.4	
04/05/2011	120		01/05/2011	131	
31/12/1985	150		31/12/2006	163	
27/09/2014	186		23/04/2015	234	



Pour des débits variants de 50 à plus de 1000 m³/s, ces images indiquent que les variations de la morphologie de la Loire entre l'ouvrage de rejet du CNPE de Saint Laurent et sa SMP aval s'avèrent moins importantes que pour les CNPE de Belleville et Dampierre.

Traçage Etiage

Le rejet a débuté le 8 septembre 2011 à 5h30 et les premiers prélèvements ont été réalisés à partir de 10h30. L'activité volumique de tritium de la bêche était de 6.6 10⁵ Bq/L, le débit volumique moyen de rejet était de 12.5 m³/h et le débit d'activité de 2.3 10⁶ Bq/s. Avec un débit moyen de la Loire à 91 m³/s, l'activité ajoutée au bon mélange était de 25.2 Bq/L.

Pendant la période de mesure, l'activité volumique mesurée à la SMP amont a varié entre 28 et 36 Bq/L avec une moyenne à 32 Bq/L. L'activité volumique moyenne à la SMP aval le 8 septembre 2011 entre 10h30 et 21h était de 44 Bq/L et elle était de 38 Bq/L entre 15h et 16h au moment de la réalisation du profil transversal d'activités volumiques au droit de cette SMP.

Entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval, le traçage a investigué 4 transects respectivement nommés section 2, 3, 4 et 5 (*Tableau 29* et *Figure 111*).

Tableau 29 : Saint Laurent - Etiage : Transects du traçage

6 SECTIONS	Distance rejet (km)
2. Aval rejet	0.3
3. Aval île Cavereau	2
4. Aval île Nouan	4.5
5. SMP Aval	5.5



Figure 111 : Saint Laurent - Etiage : Transects du traçage

Maillage

Le maillage a été construit à partir de l'image Google Earth du 6 octobre 2018 qui, avec un débit de $76.4 \text{ m}^3/\text{s}$, est celle qui s'approche le plus des conditions du traçage. Il est composé de 21 biefs ordonnés de l'amont vers l'aval et de la berge droite vers la berge gauche (Figure 112).



Figure 112 : Saint Laurent - Etiage : Vue générale du maillage

Les paramètres des mailles (Tableau 30) ainsi que la matrice des connectivités (Tableau 31) sont présentés ci-après.

Tableau 30 : Saint Laurent - Etiage : Paramètres des mailles

ID	Nom	PARAMETRES DES BIEFS				
		Longueur (m)	Pente (m/m)	Strickler (m ^{1/3} /s)	Cy (-)	Largeur (m)
1	Bief 1	540	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	182
2	Bief 2	100	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	250
3	Bief 3	128	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	25
4	Bief 4	160	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	72
5	Bief 5	148	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	78
6	Bief 6	119	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	103
7	Bief 7	210	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	105
8	Bief 8	590	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	125
9	Bief 9	158	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	106
10	Bief 10	144	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	86
11	Bief 11	94	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	65
12	Bief 12	141	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	97
13	Bief 13	682	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	85
14	Bief 14	280	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	100
15	Bief 15	872	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	170
16	Bief 16	285	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	56
17	Bief 17	302	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	177
18	Bief 18	630	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	218
19	Bief 19	290	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	193
20	Bief 20	1372	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	220
21	Bief 21	78	3.70 10 ⁻⁴	25	0.7	196

La pente (3.7 10⁻⁴ m.m⁻¹), le coefficient de Strickler (25 m^{1/3}/s) et le paramètre de diffusion (0.7) sont fixés de façon uniforme à tous les biefs.

Tableau 31 : Saint Laurent - Etiage : Matrice de connectivité

BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	1	182																			
2	250	2	5	78				167													
3		25	3		25																
4		72		4	72																
5			4	73	5	78															
6				10	3	6	103														
7					105	7	105														
8						125	8								125						
9		106						9	106												
10								86	10	86											
11								65	11	65											
12								97	12	97											
13									85	13	85										
14									100	14	100										
15										113	15	30	140								
16											56	16			56						
17											177		17	177							
18												38	179	18	218						
19															193	19	193				
20																220	20	220			
21																		196	21		

A chaque bief, les largeurs des liaisons entrantes (termes sous la diagonale) sont déterminées proportionnellement aux contributions de leur débit au débit total du bief.

Paramétrage hydraulique

Le débit entrant est attribué à l'entrée du Bief 1 (Figure 113 et Tableau 32).



Figure 113 : Saint Laurent - Etiage : Maillage au rejet

Tableau 32 : Saint Laurent - Etiage : Débits entrants

ID	Nom	Affluent droit (m ³ /s)	Liaison entrante (m ³ /s)	Affluent gauche (m ³ /s)
1	Bief 1	0	91	0

La répartition des débits aux liaisons sortantes est résolue en mode automatique au-prorata de leurs largeurs.

Paramétrage des sources

Le bruit de fond est fixé à 32 Bq/L à l'entrée du Bief 1 et le flux de rejet est réparti de façon homogène entre les 7 buses de la clarinette réparties à l'entrée du Bief 1 comme illustré par la Figure 114.

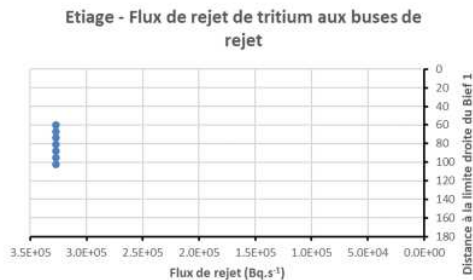


Figure 114 : Saint Laurent - Etiage : Répartition du flux de rejet aux buses

Comparaison modèle/mesures

La Figure 115 présente la comparaison du modèle aux mesures du traçage avec la distance à la rive gauche (DRG, en m) en ordonnée et les activités volumiques en abscisse.

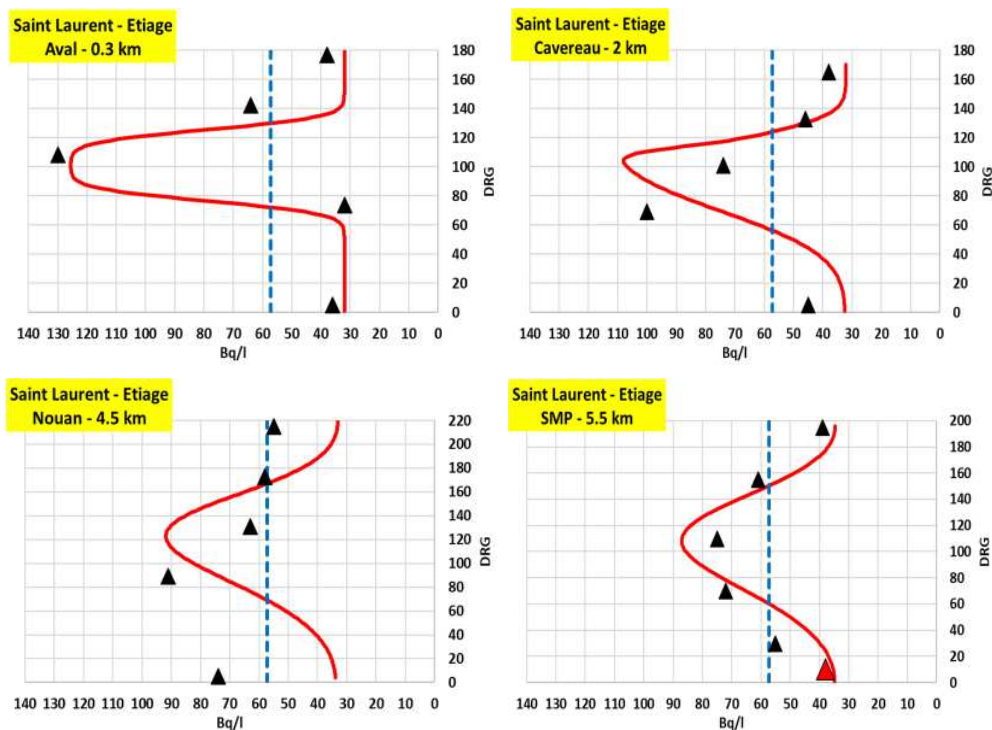


Figure 115 : Saint Laurent - Etiage : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium

(Triangles noirs : mesures ; Triangle rouge : surveillance à la SMP ; courbe rouge : modèle ; Pointillés bleus : Activité au mélange)

Du rejet à la SMP aval, le mélange homogène n'est pas atteint et le panache reste au centre de la Loire. Au point de prélèvement de la SMP aval, les activités volumiques modélisées et mesurées sont en bon accord. Elles confirment que les prélèvements près de la rive gauche ne permettaient pas de correctement surveiller le passage des rejets et elles justifient le déplacement du prélèvement à 70 m de la berge gauche qui a eu lieu fin 2018, où les activités volumiques sont proches des niveaux attendus au mélange homogène.

Traçage Module

Les premiers prélèvements ont été réalisés 19 heures après le début de rejet le 5 décembre à 15h. Le rejet a duré 43h jusqu'au 7 décembre à 10h. L'activité volumique de tritium de la bache était de $3.2 \cdot 10^6$ Bq/L, le débit volumique moyen de rejet était de $11.4 \text{ m}^3/\text{h}$ et le débit d'activité de $10.1 \cdot 10^6$ Bq/s. Avec un débit moyen de la Loire à $345 \text{ m}^3/\text{s}$, l'activité ajoutée au bon mélange était de 29.4 Bq/L.

Pendant la période de mesure, l'activité volumique mesurée à la SMP amont est restée inférieure au seuil de décision à 2.5 Bq/L. L'activité volumique mesurée à la SMP aval entre 10h et 11h est également inférieure au seuil de détection.

Entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval, le traçage a investigué les 3 transects correspondants aux sections 2, 3 et 5 (Tableau 33 et Figure 111).

Tableau 33 : Saint Laurent - Module : Transects du traçage

6 SECTIONS	Distance rejet (km)
2. Aval rejet	0.3
3. Aval île Cavereau	2
5. SMP Aval	5.5



Figure 116 : Saint Laurent - Module : Transects du traçage

Maillage

Le maillage est construit à partir de l'image Google Earth du 31 décembre 2008 qui, avec un débit de $273 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, est la plus proche des conditions du traçage. Il est identique à celui du traçage à l'étiage.

Paramétrage hydraulique

Le débit entrant est attribué à l'entrée du Bief 1 (Tableau 34). La répartition des débits aux liaisons sortantes est résolue en mode automatique au-prorata de leurs largeurs.

Tableau 34 : Saint Laurent - Module : Débits entrants

ID	Nom	Affluent droit (m^3/s)	Liaison entrante (m^3/s)	Affluent gauche (m^3/s)
1	Bief 1	0	345	0

Paramétrage des sources

Le bruit de fond est fixé à 2 Bq/L à l'entrée du Bief 1 et le flux de rejet est réparti de façon homogène entre les 7 buses de la clarinette réparties à l'entrée du Bief 1 comme illustré par la Figure 117.

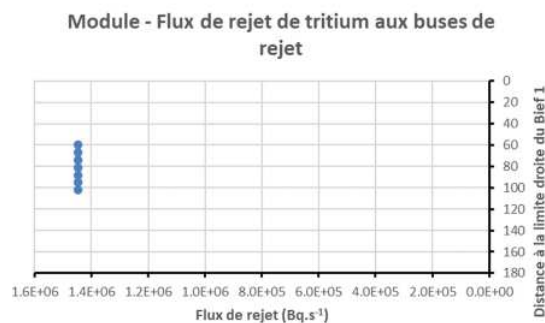


Figure 117 : Saint Laurent - Module : Répartition du flux de rejet aux buses

Comparaison modèle/mesures

La Figure 118 présente la comparaison du modèle aux mesures du traçage avec la distance à la rive gauche (DRG, en m) en ordonnée et les activités volumiques en abscisse.

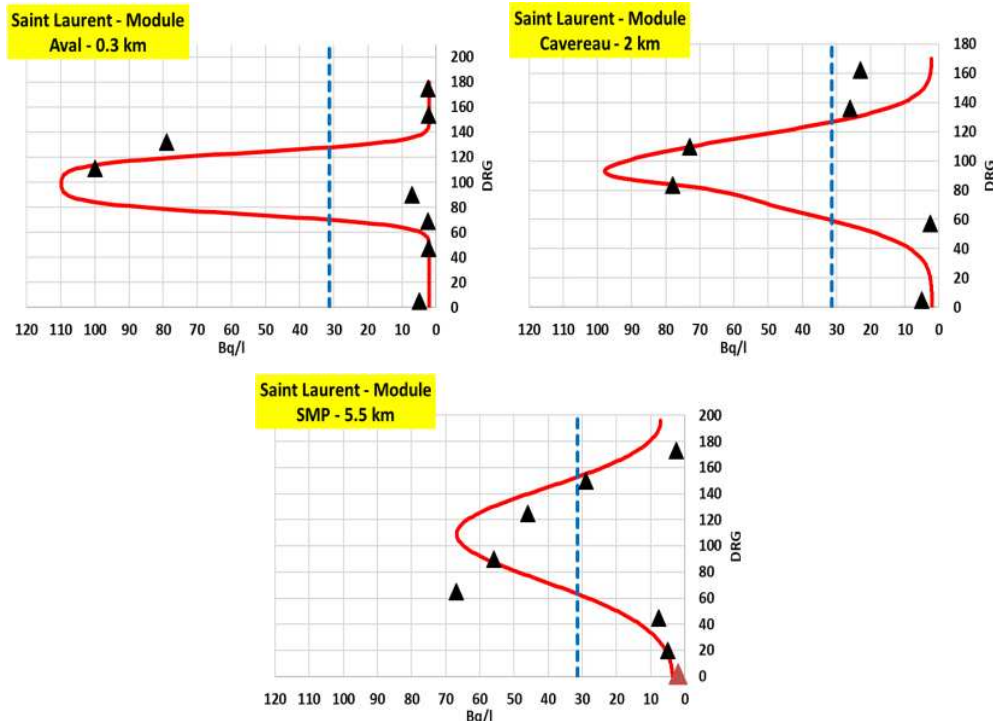


Figure 118 : Saint Laurent - Module : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium

(Triangles noirs : mesures ; Triangle rouge : surveillance à la SMP ; courbe rouge : modèle ; Pointillés bleus : Activité au mélange)

Comme à l'étiage, le mélange n'est pas homogène au droit de la SMP aval où le panache reste essentiellement positionné au centre de la Loire. Les activités volumiques modélisées sont en bon accord avec celles mesurées pour le traçage et par la surveillance et confirment la mauvaise représentativité du prélèvement lorsque celui-ci était réalisé près de la berge gauche. Bien que les conditions d'un mélange homogène ne soient pas atteintes à la SMP aval, la Figure 118 montre que le déplacement du prélèvement à 70 m de la berge gauche permet à la station d'être représentative des niveaux attendus au mélange homogène.

CNPE de Civaux

Pour le CNPE de Civaux, la calibration de CASTEAUR2D est réalisée à partir de cinq traçages liquides à la rhodamine B effectués par l'IPSN entre 1994 et 1996 pour localiser la zone de mélange homogène en aval de l'ouvrage de rejet. Ces traçages concernent deux conditions d'étiage (Etiage I, Etiage II), deux conditions de module (Module I, Module II) et une condition de crue (Crue) ([10][11]). Aux dates de réalisation des traçages Etiage I, Module I et Crue, l'ouvrage de rejet n'était pas encore opérationnel et il a été simulé par un système d'injection en surface. Bien que ce système reproduise une configuration proche de celle de l'installation, sa représentativité reste néanmoins limitée vis-à-vis de la distribution des concentrations qui serait obtenue dans le champ proche de l'ouvrage de rejet. Les caractéristiques opératoires de ces traçages sont données dans le Tableau 35 :

Tableau 35 : Caractéristiques des traçages au CNPE de Civaux

	Etiage I	Etiage II	Module I	Module II	Crue
Date	20/08/1994	11/06/1996	08/12/1995	16/12/1996	17/02/1995
Débit moyen Vienne (m³/s)	24	26.8	75	100	275
Dispositif rejet	Conduite Courte simulée	Conduite Longue	Conduite Longue simulée	Conduite Longue	Conduite Longue simulée
Durée d'injection	6h30	5h35	5h00	4h45	4h20
Débit volumique rejet (L/s)	7 10 ⁻³	4.4 10 ⁻³	4.2 10 ⁻³	6.6 10 ⁻³	7.4 10 ⁻³
Concentration solution (g/L)	100	70	140	240	200
Débit massique rejet (g/s)	0.7	0.31	0.6	1.58	1.5
CBM attendue (µg/L)	29.30	11.6	8.15	15.8	5.7

Le protocole pour localiser la zone de mélange homogène consistait à réaliser des profils transversaux de concentrations en de nombreux transects en aval de l'ouvrage de rejet. Pour cela, des mesures directes par fluorimétrie étaient réalisées de façon continue en traversant ces transects à l'aide d'une embarcation se déplaçant à une vitesse maintenue autant que possible constante et en recherchant à partir de quel transect les profils transversaux devenaient homogènes. Si ce protocole est bien adapté à la localisation de la zone de mélange homogène, il faut considérer pour la présente étude qu'il est relativement imprécis sur le positionnement transversal des mesures.

Images satellites et conditions de débit

Le logiciel Google Earth propose 14 dates de prises de vue de la zone comprise entre l'ouvrage de rejet et la SMP aval. Le Tableau 36 récapitule ces différentes dates avec les débits moyens journaliers ordonnés du plus faible au plus fort.

Tableau 36 : Civaux - Images Google Earth et débits de la Loire

Dates	Débit Vienne à Lussac les Châteaux (HydroPortail) (m³/s)	Images	Dates	Débit Vienne à Lussac les Châteaux (HydroPortail) (m³/s)	Images
15/09/2018	14.2		14/08/2019	14.6	

28/09/2018	15.5		29/09/2018	15.8	
4/08/2018	16		16/07/2022	18.1	
14/07/2013	26.6		3/09/2019	27.7	
15/10/2012	27.8		6/04/2011	34.4	
7/04/2015	36.5		31/12/2007	47	



Pour des débits de la Vienne variants de 14.2 à 174 m³/s, ces images montrent que la morphologie de la Vienne entre l'ouvrage de rejet du CNPE et la SMP aval reste stable et que les variations sont beaucoup moins importantes que pour les autres CNPE du bassin de la Loire.

Traçage Etiage I

Ce traçage a été réalisé avec un débit moyen de la Vienne de 24 m³/s et avec un dispositif simulant les rejets par la conduite courte.

Maillage

Le domaine d'étude est modélisé par 22 biefs définis à partir de l'image satellite du 14/07/2013 qui, avec un débit de la Vienne à 26.6 m³/s, est celle qui s'approche au plus près des conditions du traçage. Ces biefs sont illustrés sur la Figure 119.

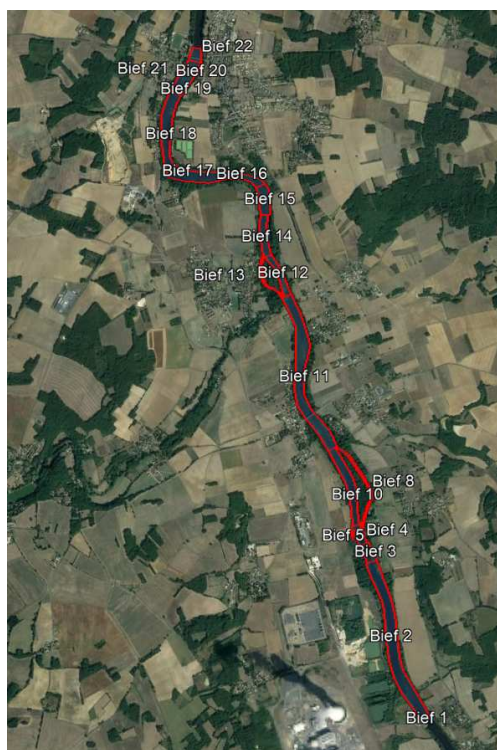


Figure 119 : Civaux Etiage I : Biefs modélisés

Les paramètres des mailles (Tableau 37) ainsi que la matrice des connectivités (Tableau 38) sont présentés ci-après.

Tableau 37 : Civaux Etiage I : Paramètres des biefs

PARAMETRES DES BIEFS						
ID	Nom	Longueur (m)	Pente (m/m)	Strickler (m ^{1/3} /s)	Cy (-)	Largeur (m)
1	Bief 1	30	5.00E-04	25	0.7	81
2	Bief 2	1450	5.00E-04	25	0.7	81
3	Bief 3	170	5.00E-04	25	0.7	81
4	Bief 4	65	5.00E-04	25	0.7	66.6
5	Bief 5	40	5.00E-04	25	0.7	90
6	Bief 6	45	5.00E-04	25	0.7	76.5
7	Bief 7	50	5.00E-04	25	0.7	12.6
8	Bief 8	830	5.00E-04	25	0.7	12.6
9	Bief 9	35	5.00E-04	25	0.7	76.5
10	Bief 10	705	5.00E-04	25	0.7	58.5
11	Bief 11	1435	5.00E-04	25	0.7	76.5
12	Bief 12	390	5.00E-04	25	0.7	49.5
13	Bief 13	450	5.00E-04	25	0.7	15.3
14	Bief 14	360	5.00E-04	25	0.7	54
15	Bief 15	260	5.00E-04	25	0.7	81
16	Bief 16	390	5.00E-04	25	0.7	54
17	Bief 17	430	5.00E-04	25	0.7	90
18	Bief 18	670	5.00E-04	25	0.7	67.5
19	Bief 19	200	5.00E-04	25	0.7	101.7
20	Bief 20	160	5.00E-04	25	0.7	10.8
21	Bief 21	130	5.00E-04	25	0.7	90
22	Bief 22	120	5.00E-04	25	0.7	72

La pente ($5 \cdot 10^{-4}$ m/m), le coefficient de Strickler (25 m^{1/3}/s) et le paramètre de diffusion (0.7) sont fixés de façon uniforme à tous les biefs.

Tableau 38 : Civaux Etiage I : Matrice de connectivité

BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	5																					
2	81	2																				
3		81	1																			
4			66.6	4																		
5				90	56.6																	
6					80	10																
7						5	18															
8							7	12.6														
9								8	12.6													
10									2	76.5												
11										10	58.5											
12											11	61.2	15.3									
13												22	49.5	15.3								
14													13	43.2	10.8	54						
15														81	15	81						
16															54	15	54					
17																90	12	90				
18																	67.5	18	67.5			
19																		101.7	19	10.8	90.9	10.8
20																			10.8	20	21	90
21																				90	7.6	64.4
22																						22

Les largeurs des liaisons entrantes (termes sous la diagonale) sont déterminées proportionnellement aux contributions de leur débit au débit total du bief.

Paramétrage hydraulique

Un débit d'apport de $24 \text{ m}^3/\text{s}$ est attribué à la liaison entrante du Bief 1. La répartition des débits aux liaisons sortantes est résolue en mode automatique au prorata de leurs largeurs.

Paramétrage des sources

Les rejets sont paramétrés à partir du profil transversal des CDL obtenu à 100 m en aval immédiat du barrage seuil (Figure 120).

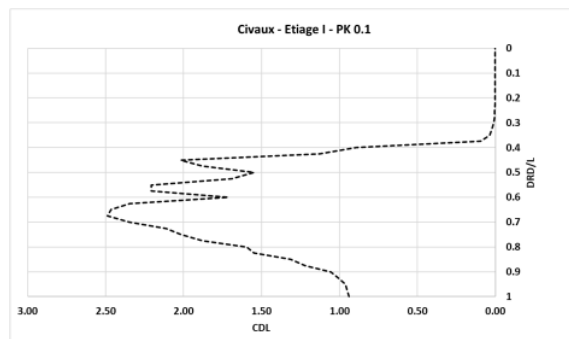


Figure 120 : Civaux Etiage I : Profil transversal des CDL au PK 0.1 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L

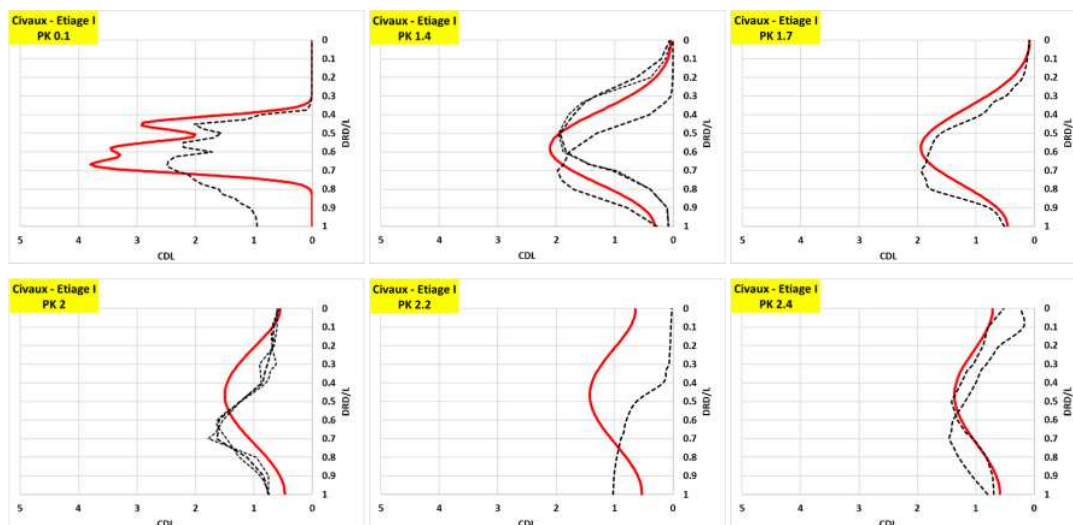
La Figure 120 montre trois pics aux distances adimensionnées 0.45, 0.575 et 0.675 avec des CDL respectifs de 2.02, 2.21 et 2.49 qui conduisent à positionner les trois points de rejet à l'entrée du domaine tels que définis dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Civaux Etiage I : Données des rejets

DRD/L	CDLr	β_r	$q_r \text{ (m}^3/\text{s)}$
0.450	2.02	0.81	7.21
0.575	2.21	0.89	7.89
0.675	2.49	1.00	8.89

Comparaison modèle/mesures

La Figure 121 présente les comparaisons modèle/mesure aux différents transects de mesure du traçage Etiage I avec la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur en ordonnée et les CDL en abscisse.



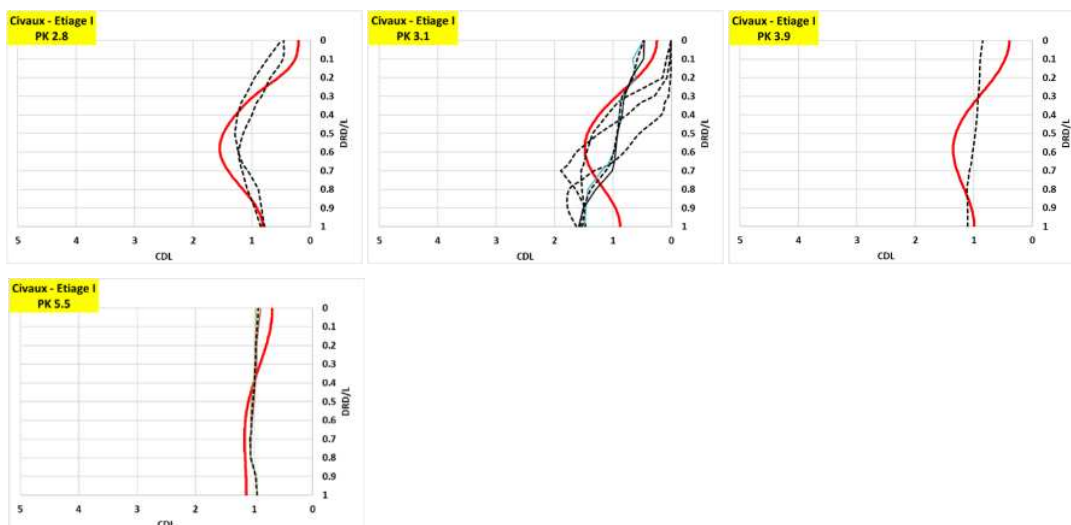


Figure 121 : Civaux Etiage I : Comparaison modèle/mesure des CDL

(Courbe rouge : modèle ; Pointillés noirs : mesures)

Compte tenu des imprécisions sur le positionnement transversal des mesures, le modèle reproduit de façon satisfaisante la dynamique et l'amplitude des profils sur l'ensemble du domaine à l'exception du profil à 100 m des rejets qui correspond au champ proche. A la SMP aval à 5.5 km en aval, les mesures et le modèle s'accordent sur l'obtention des conditions de mélange homogène.

Traçage Etiage II

Ce traçage a été réalisé pour un débit moyen de la Vienne de $26.8 \text{ m}^3/\text{s}$ et avec rejet réalisé par la conduite longue.

Maillage

Le maillage est identique à celui appliqué au traçage Etiage I car les conditions hydrauliques sont identiques.

Paramétrage hydraulique

Un débit d'apport de $27 \text{ m}^3/\text{s}$ est attribué à la liaison entrante du Bief 1 et la répartition des débits aux liaisons sortantes est résolue en mode automatique au prorata de leurs largeurs.

Paramétrage des sources

Les rejets sont paramétrés à partir du profil transversal des CDL mesuré à 100 m en aval de l'ouvrage de rejet (Figure 122).

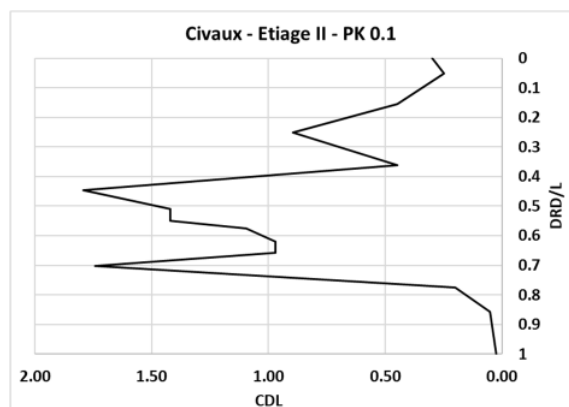


Figure 122 : Civaux Etiage II : Profil transversal des CDL au PK 0.1 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L

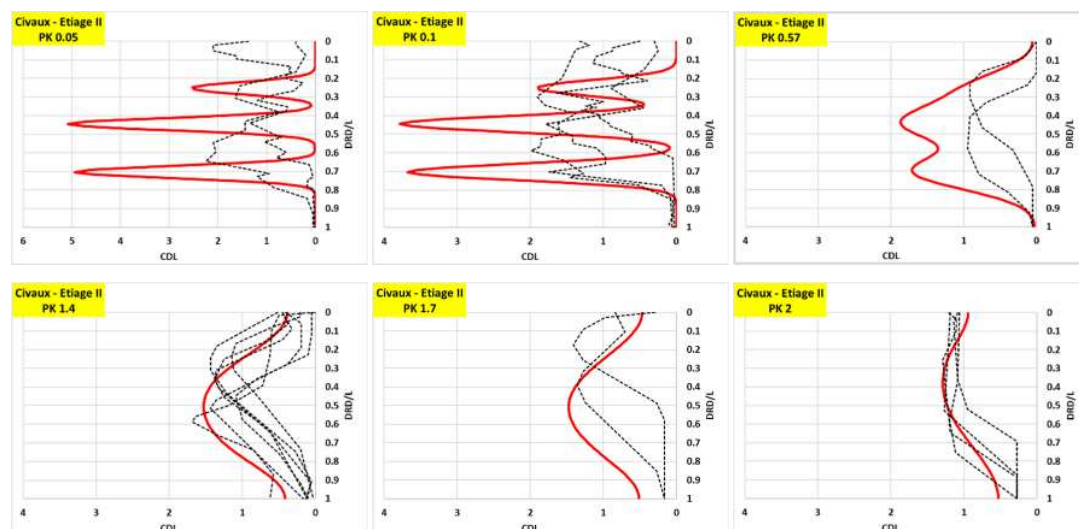
La Figure 120 laisse apparaître trois pics aux positions latérales adimensionnées 0.252, 0.445 et 0.703 avec des CDL respectifs de 0.9, 1.79 et 1.74. A partir de ces données, trois points de rejet sont positionnés à la section entrante du premier bief (Tableau 40).

Tableau 40 : Civaux Etiage II : Données de rejet

DRD/L	CDL	β_r	qr (m ³ /s)
0.252	0.9	0.50	5.48
0.445	1.79	1.00	10.91
0.703	1.74	0.97	10.60

Comparaisons modèle/mesures

La Figure 123 présente les comparaisons modèle/mesure obtenues aux différents transects mesurés pendant ce traçage avec la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur en ordonnée et les CDL en abscisse.



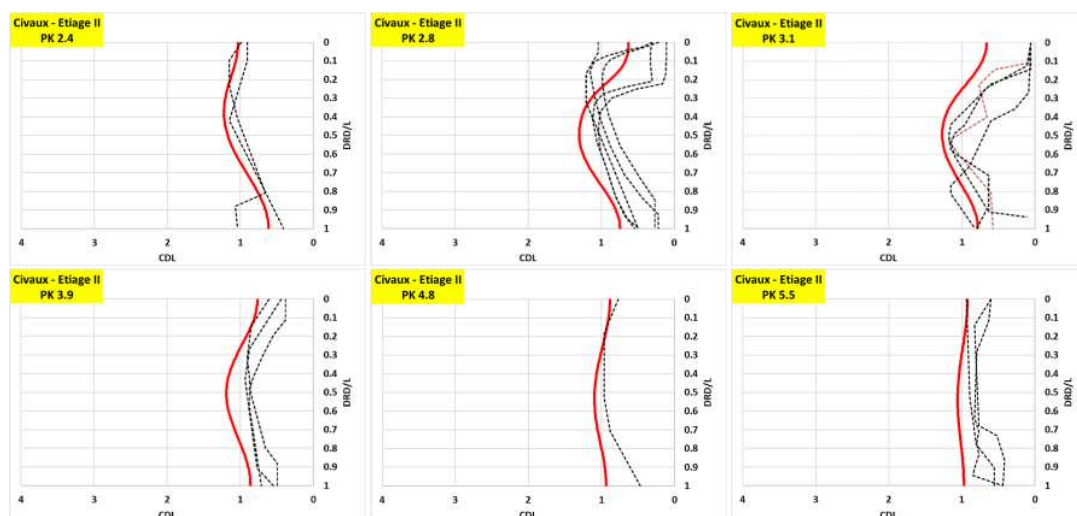


Figure 123 : Civaux Etiage II : Comparaison modèle/mesure des CDL

(Courbe rouge : modèle ; Pointillés noirs : mesures)

Jusqu'à 570 m, les CDL modélisés sont nettement supérieurs aux mesures. Au-delà, les modélisations sont comparables aux mesures qui sont équivalentes, en dynamique et en amplitude, à celles du traçage Etiage I. Comme précédemment, les conditions de mélange homogène sont retrouvées à la SMP aval, à 5.5 km, où les mesures et le modèle s'accordent sur une répartition transversale uniforme des CDL.

Traçage Module I

Ce traçage a été réalisé avec un débit moyen de la Vienne de 75 m³/s et avec un rejet réalisé par un dispositif simulant la conduite longue.

Maillage

Le paramétrage hydrographique reprend les mêmes biefs que pour l'étiage (Figure 119) avec une réduction du paramètre de diffusion à 0.55 et une augmentation de 10 % des largeurs à l'exception de celle du premier bief qui correspond à l'ouvrage de rejet (Tableau 41).

Tableau 41 : Civaux Module I : Paramètres des biefs

PARAMETRES DES BIEFS						
ID	Nom	Longueur (m)	Pente (m/m)	Strickler (m ^{1/3} /s)	Cy (-)	Largeur (m)
1	Bief 1	30	5.00E-04	25	0.55	81
2	Bief 2	1450	5.00E-04	25	0.55	90
3	Bief 3	170	5.00E-04	25	0.55	90
4	Bief 4	65	5.00E-04	25	0.55	74
5	Bief 5	40	5.00E-04	25	0.55	100
6	Bief 6	45	5.00E-04	25	0.55	85
7	Bief 7	50	5.00E-04	25	0.55	14
8	Bief 8	830	5.00E-04	25	0.55	14
9	Bief 9	35	5.00E-04	25	0.55	85
10	Bief 10	705	5.00E-04	25	0.55	65
11	Bief 11	1435	5.00E-04	25	0.55	85
12	Bief 12	390	5.00E-04	25	0.55	55

13	Bief 13	450	5.00E-04	25	0.55	17
14	Bief 14	360	5.00E-04	25	0.55	60
15	Bief 15	260	5.00E-04	25	0.55	90
16	Bief 16	390	5.00E-04	25	0.55	60
17	Bief 17	430	5.00E-04	25	0.55	100
18	Bief 18	670	5.00E-04	25	0.55	75
19	Bief 19	200	5.00E-04	25	0.55	113
20	Bief 20	160	5.00E-04	25	0.55	12
21	Bief 21	130	5.00E-04	25	0.55	100
22	Bief 22	120	5.00E-04	25	0.55	80

Le Tableau 42 ci-après donne la matrice des connectivités entre ces biefs.

Tableau 42 : Civaux Module I : Matrice de connectivité

BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	1	81.00																				
2	90.00	2	90.00																			
3			3	90.00																		
4				4	74.00																	
5					5	100.00																
6						6	88.00	20.00														
7							7	18.00	67.00													
8								8	14.00													
9									9	14.00												
10										10	20.47											
11											11	65.00										
12												12	85.00									
13													13	65.00	17.00							
14														14	55.00							
15															15	17.00						
16																16	48.00	12.00				
17																	17	90.00				
18																		18	60.00			
19																			19	100.00		
20																				75.00		
21																					12.00	101.00
22																						12.00

A chaque bief, les largeurs des liaisons entrantes (termes sous la diagonale) sont déterminées proportionnellement aux contributions de leur débit au débit total du bief.

Paramétrage hydraulique

Un débit d'apport de 75 m³/s est appliqué à la liaison entrante du Bief 1 et la répartition des débits aux liaisons sortantes est résolue de façon automatique au prorata de leurs largeurs.

Paramétrage des sources

Les rejets sont paramétrés à partir du profil transversal des CDL mesurés à 15 m en aval de l'ouvrage de rejet (Figure 124).

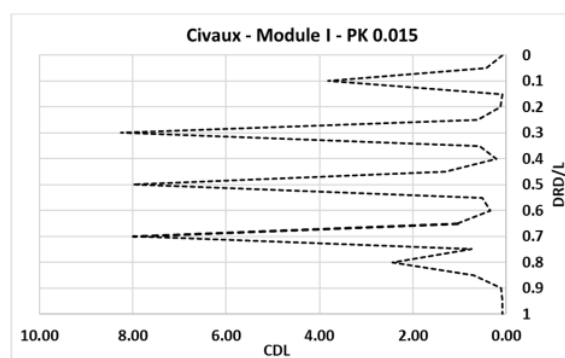


Figure 124 : Civaux Module I : Profil transversal des CDL au PK 0.015 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L

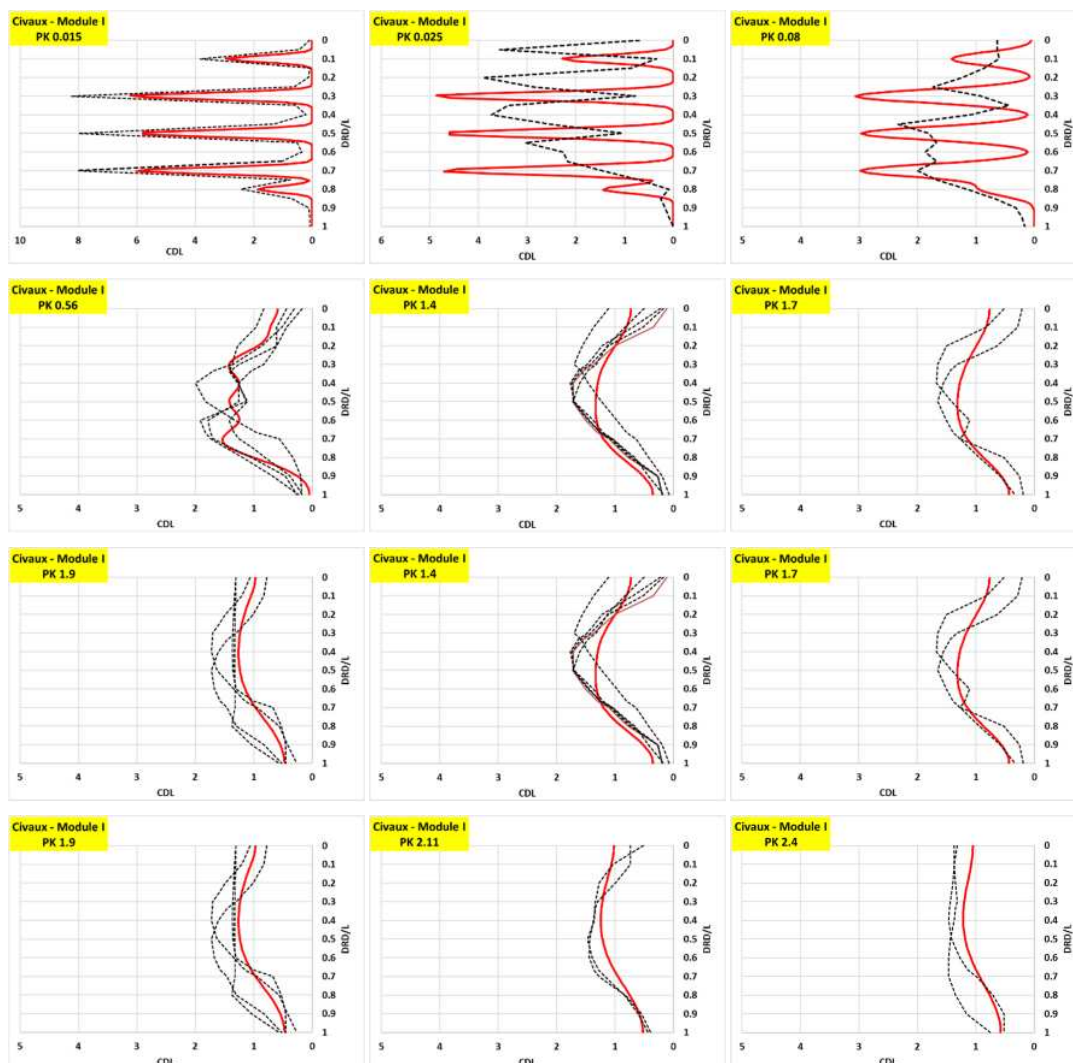
La Figure 124 montre cinq pics positionnés aux distances adimensionnées 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 et 0.8 avec des CDL respectifs de 3.82, 8.25, 7.99, 7.99, et 2.43. Cinq points de rejet sont appliqués à la liaison entrante du premier bief avec les paramètres précisés dans le Tableau 43.

Tableau 43 : Civaux Module I : Données de rejet

DRD/L	CDL	β_r	qr (m³/s)
0.1	3.82	0.46	9.40
0.3	8.25	1.00	20.30
0.5	7.99	0.97	19.66
0.7	7.99	0.97	19.66
0.8	2.43	0.29	59.79

Comparaison modèle/mesures

La Figure 125 présente les comparaisons modèles/mesures obtenues aux différents transects de ce tracé avec la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur en ordonnée et les CDL en abscisse.



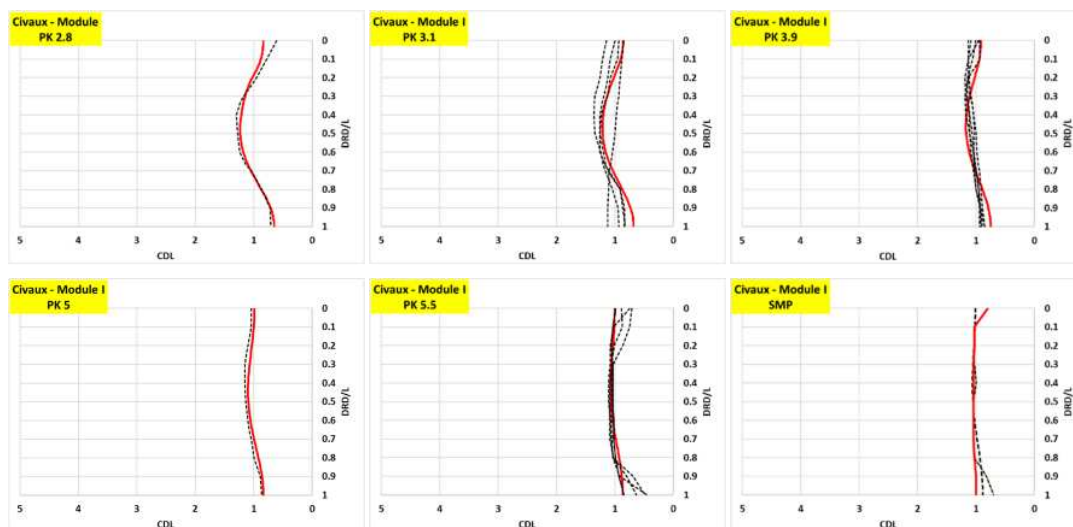


Figure 125 : Civaux Module I : Comparaison modèle/mesure des CDL

(Courbe rouge : modèle ; Pointillés noirs : mesures)

Comme pour les conditions d'étiage, l'accord modèle/mesure est obtenue à partir de 500 m en aval des rejets et les conditions de mélange homogène sont vérifiées à la SMP aval où les distributions transversales des CDL modélisés et mesurés sont uniformes et égales à 1.

Traçage Module II

Ce second traçage au module a été réalisé avec un débit moyen de la Vienne de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et en effectuant les rejets à partir de la conduite longue.

Maillage

Le maillage est identique à celui du traçage Module I.

Paramétrage hydraulique

Le débit d'apport à la liaison entrante du Bief 1 est de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. La répartition des débits aux liaisons sortantes est résolue en mode automatique au prorata de leurs largeurs.

Paramétrage des sources

Les rejets sont paramétrés à partir du profil transversal des CDL obtenu à 10 m en aval de l'ouvrage de rejet (Figure 126).

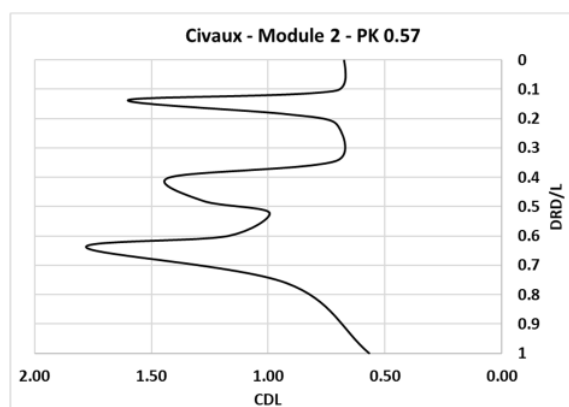


Figure 126 : Civaux Module II : Profil transversal des CDL au PK 0.01 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L

La Figure 126 laisse apparaître trois pics positionnés aux distances adimensionnées à la berge droite de 0.14, 0.40 et 0.64 et avec des CDL respectifs de 1.60, 1.42 et 1.78. Pour les calculs, ces trois pics sont associés à trois points de rejet positionnés à la section entrante du premier bief avec les paramètres précisés dans le Tableau 44.

Tableau 44 : Civaux Module II : Données de rejet

DRD/L	CDL	β_r	qr (m ³ /s)
0.14	1.60	0.899	33.33
0.40	1.42	0.798	29.58
0.64	1.78	1.000	37.08

Comparaison modèle/mesures

La Figure 127 présente les comparaisons modèles/mesures obtenues aux différents transects renseignés par le traçage Module II avec la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur en ordonnée et les CDL en abscisse.

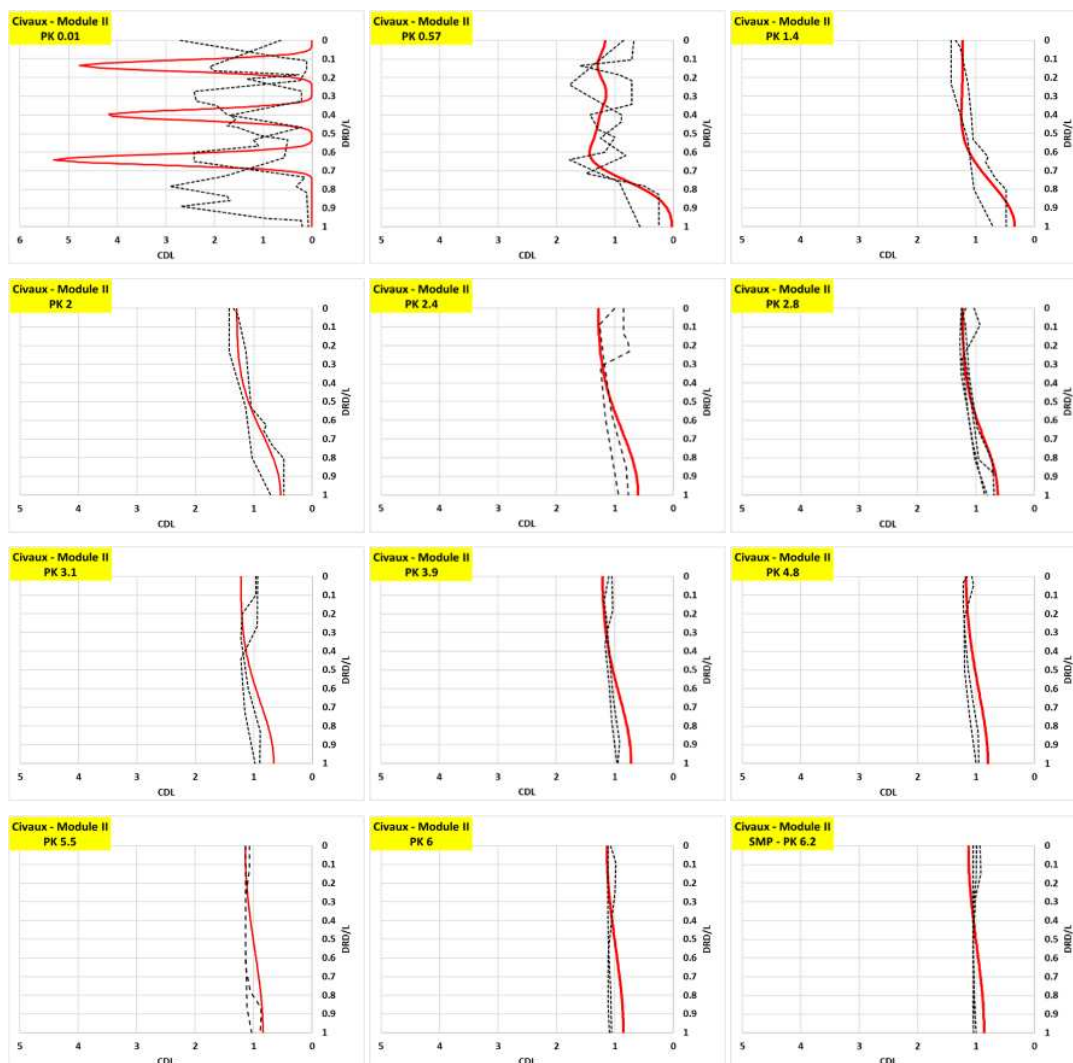


Figure 127 : Civaux Module II : Comparaison modèle/mesure des CDL

(Courbe rouge : modèle ; Pointillés noirs : mesures)

Comme pour les conditions précédentes, le modèle surestime les mesures dans le champ proche des rejets et s'en rapproche à partir de 570 m en aval de l'ouvrage de rejet. À la SMP aval, le profil transversal des CDL est bien représentatif des conditions d'un mélange homogène.

Traçage Crue

Pour les conditions de crue, le traçage a été réalisé pour un débit de la Vienne de 275 m³/s et avec rejet réalisé à partir d'un dispositif simulant la conduite longue.

Maillage

Le maillage reprend celui du traçage module I avec un élargissement des mailles de 10%.

Paramétrage hydraulique

Le débit d'apport à la liaison entrante du Bief 1 est de 275 m³/s et les répartitions des débits aux liaisons sortantes des biefs sont résolues en mode automatique au-prorata des largeurs.

Paramétrage des sources

Les rejets sont paramétrés à partir du profil transversal des CDL mesuré à 100 m en aval de l'ouvrage de rejet (Figure 128).

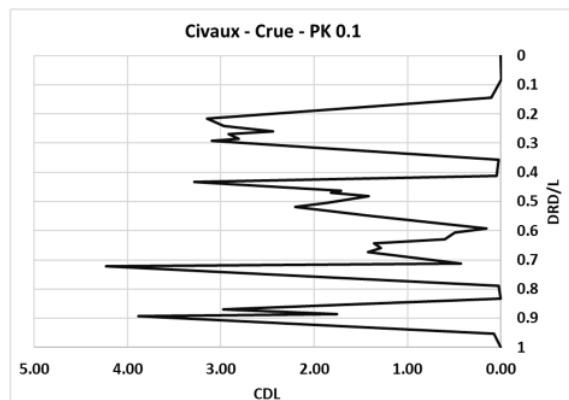


Figure 128 : Civaux Crue : Profil transversal des CDL au PK 0.01 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L

Cette figure montre la présence des pics consécutifs aux points d'injection. Le positionnement et les paramètres des rejets sont détaillés dans le Tableau 45.

Tableau 45 : Civaux Crue : Données de rejet

DRD/L	CDL	β_r	qr (m ³ /s)
0.216	3.15	0.745	40.84
0.293	3.10	0.733	40.19
0.433	3.28	0.775	42.52
0.519	2.20	0.520	28.52
0.644	1.36	0.322	17.63
0.721	4.23	1.000	54.84
0.894	3.89	0.920	50.43

Comparaison modèle/mesures

La Figure 129 présente les comparaisons modèles/mesures obtenues aux différents transects du traçage Module II avec la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur en ordonnée et les CDL en abscisse.

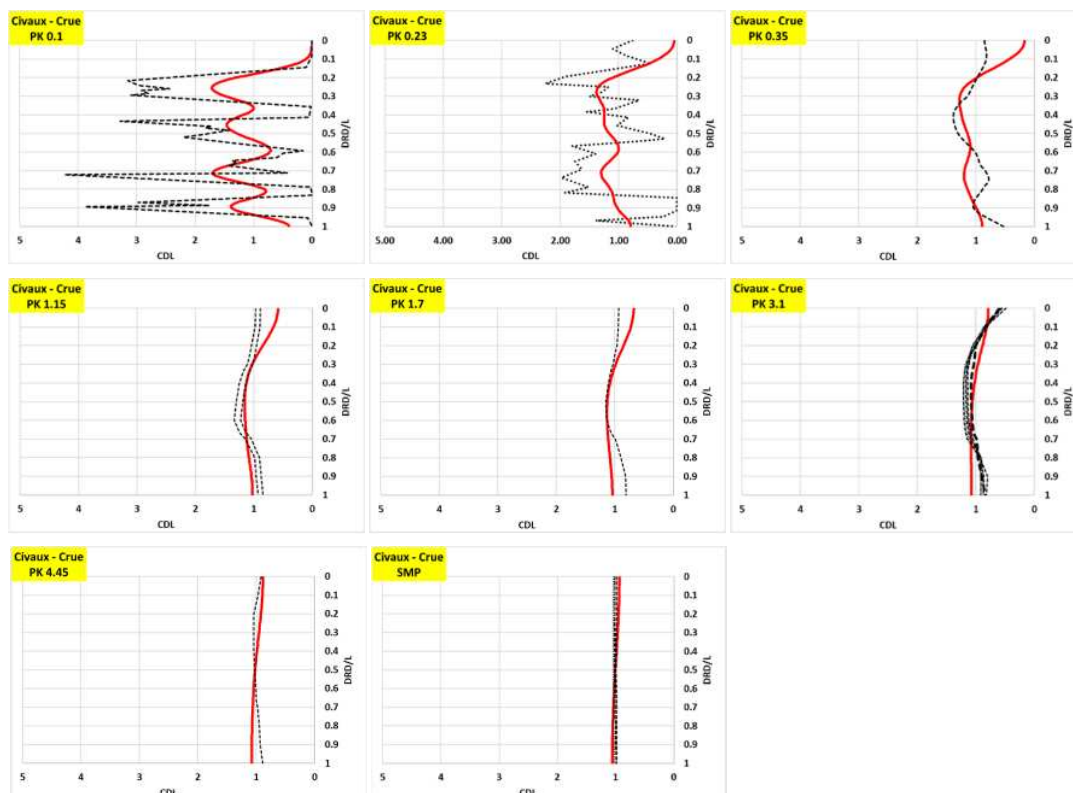


Figure 129 : Civaux Crue : Comparaison modèle/mesure des CDL

(Courbe rouge : modèle ; Pointillés noirs : mesures)

Comme pour les conditions d'étiage et de module les conditions de mélange homogènes sont obtenues à la SMP aval où les distributions transversales des CDL modélisés et mesurés sont uniformes et égales à 1.

GLOSSAIRE

Terme	Définition
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)	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. 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.
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.
Bruit de fond	On désigne par « bruit de fond » radiologique environnemental, les activités volumiques 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. 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.
CDL	Le coefficient de dilution liquide en un point d'une section de cours d'eau est égal au rapport $\frac{\text{Activité mesurée}_{\text{point en aval du rejet}} - \text{Activité mesurée}_{\text{amont du rejet}}}{\text{Activité ajoutée attendue}}$, où l'activité ajoutée attendue est égale à l'activité moyenne ajoutée, calculée après mélange complet des rejets du CNPE surveillé dans 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.
CNPE	Centre nucléaire de production d'électricité

Terme	Définition
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.
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 en aval d'un rejet à partir de laquelle les activités volumiques induites par l'effluent sont homogènes sur la largeur du cours d'eau.
Echantillon aliquote	Fraction d'un échantillon identique à l'échantillon mère.
Echantillon composite	Echantillon qui combine plusieurs échantillons prélevés à différents moments et/ou lieux en un seul échantillon composite.
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 répertoriant 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...
Module	Débit hydrologique moyen interannuel (pluriannuel) d'un cours d'eau.
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 en amont et en 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.

Terme	Définition
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.

Table des illustrations et tableaux

■ Illustrations

Figure 1 : Emplacement des cinq CNPE du bassin versant de la Loire et de la Vienne	11
Figure 2 : CNPE de Belleville-sur-Loire	12
Figure 3 : Visualisation satellite de l'ouvrage de rejet du CNPE de Belleville-sur-Loire	12
Figure 4 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Belleville sur Loire	13
Figure 5 : SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire au sein de l'écluse des Mantelots	13
Figure 6 : CNPE de Dampierre en Burly	14
Figure 7 : Implantation des ouvrages liés au prélèvement d'eau et aux rejets du CNPE de Dampierre-en-Burly	14
Figure 8 : Visualisation satellite de l'ouvrage de rejet en Loire du CNPE de Dampierre-en-Burly	15
Figure 9 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly	15
Figure 10 : SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly	16
Figure 11 : CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	16
Figure 12 : Visualisation satellite de l'ouvrage de rejet du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	17
Figure 13 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	17
Figure 14 : SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	18
Figure 15 : CNPE de Chinon	18
Figure 16 : Visualisation satellitaire de l'ouvrage de rejet du CNPE de Chinon	19
Figure 17 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Chinon	19
Figure 18 : SMP aval du CNPE de Chinon	20
Figure 19 : CNPE de Civaux	20
Figure 20 : Visualisation satellitaire de l'ouvrage de rejet du CNPE de Civaux	21
Figure 21 : Situation géographique de la SMP aval du CNPE de Civaux	21
Figure 22 : Visualisation satellitaire du positionnement de la SMP aval du CNPE de Civaux	22
Figure 23 : Positionnement des stations multi-paramètres (SMP) des CNPE de la Loire et de la Vienne	24
Figure 24 : Exemple de chronique des mesures d'activités volumiques de ^3H dans les mesures quotidiennes à une SMP aval (site de Dampierre, 2 nd semestre 2019) issue du RNM	27
Figure 25 : Exemple de la modélisation 1D de l'activité volumique du tritium à la SMP aval du CNPE de Dampierre au 2 nd semestre 2019	28
Figure 26 : CASTEUR2D - Exemple de représentation d'un domaine de calcul	29
Figure 27 : Exemple de comparaison modèle/mesures d'activités volumiques de ^3H à une SMP aval (site de Dampierre, 2 nd semestre 2019)	30
Figure 28 : Exemple de graphe du pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision pendant les rejets du CNPE surveillé (ici Civaux) quand il est le principal contributeur à l'activité volumique attendue qui est supérieure à 5 Bq/L, par mois entre janvier 2017 et avril 2021	31
Figure 29 : Exemple du rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval d'un CNPE, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L et que le CNPE surveillé en est le principal contributeur	33
Figure 30 : Exemple de modélisation 2D de CDL au droit d'une SMP aval (cas du CNPE de Dampierre-en-Burly)	34
Figure 31 : Exemple de comparaison en fonction des classes de débit des CDL issus de la modélisation 2D au point de prélèvement d'une SMP aval à ceux donnés par l'analyse 1D (cas du CNPE de Dampierre-en-Burly)	34

Figure 32 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en ^3H à la SMP aval du CNPE de Belleville, sur le premier semestre 2017	35
Figure 33 : Pourcentages mensuels des mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Belleville-sur Loire pendant les rejets du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021	36
Figure 34 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire pendant les rejets du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	36
Figure 35 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, pendant les rejets du CNPE	37
Figure 36 : Distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Belleville sur Loire	38
Figure 37 : CDL à la SMP aval du CNPE de Belleville-sur-Loire (modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D).....	38
Figure 38 : Comparaison des mesures d'activités volumiques de ^3H aux prévisions du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly en 2017	40
Figure 39 : Activités volumiques de tritium (Bq/L) mesurées à la SMP aval de Dampierre-en-Burly entre 2009 et 2021, extraites du RNM	40
Figure 40 : Pourcentage mensuel de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval de Dampierre-en-Burly quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021.....	42
Figure 41 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	42
Figure 42 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, quand le CNPE en est le principal contributeur	43
Figure 43 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due au seul CNPE situé en amont	44
Figure 44 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont	44
Figure 45 : Distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly.....	45
Figure 46 : CDL à la SMP aval du CNPE de Dampierre-en-Burly (modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D), en excluant la période entre février et novembre 2017	45
Figure 47 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en ^3H à la SMP aval du CNPE de Saint Laurent-des-Eaux, sur le premier semestre 2018 (avant le déplacement du prélèvement) et le second semestre 2019 (après le déplacement du prélèvement).....	47
Figure 48 : Pourcentage mensuel de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021.....	48
Figure 49 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021	48
Figure 50 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Saint -Laurent-des-Eaux, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité attendue	49

Figure 51 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval de Saint-Laurent-des-Eaux, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont.....	50
Figure 52 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont	51
Figure 53 : Ecart relatif entre le débit mesuré et le débit attendu par le modèle 1D aux stations HYDRO d'Orléans et de Blois à partir des débits mesurés à la station HYDRO de Gien, par classe de débits, sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	52
Figure 54 : Distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux	52
Figure 55 : CDL à la SMP aval du CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux (modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D) à la suite du déplacement du point de prélèvement fin 2018	53
Figure 56 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en ^3H à la SMP aval du CNPE de Chinon, sur l'année 2020.....	54
Figure 57 : Pourcentages mensuels de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Chinon quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021.....	55
Figure 58 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Chinon quand le CNPE est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021	55
Figure 59 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Chinon, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, quand le CNPE en est le principal contributeur	56
Figure 60 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Chinon, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont	57
Figure 61 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Chinon, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, en l'absence de rejet du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, due aux seuls CNPE situés en amont.....	57
Figure 62 : Distribution transversale des CDL modélisés dans les deux bras de la Loire au droit de la SMP aval du CNPE de Chinon	58
Figure 63 : CDL à la SMP aval du CNPE de Chinon : modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D	58
Figure 64 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en ^3H à la SMP aval du CNPE de Civaux, sur le premier semestre 2017	59
Figure 65 : Pourcentages mensuels des mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Civaux pendant les rejets du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021	60
Figure 66 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision à la SMP aval du CNPE de Civaux pendant les rejets du CNPE et quand le modèle attend une activité supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	60
Figure 67 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D à la SMP aval du CNPE de Civaux par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021, pendant les rejets du CNPE.....	61
Figure 68 : Distribution transversale des CDL modélisés au droit de la SMP aval du CNPE de Civaux	62
Figure 69 : CDL à la SMP aval du CNPE de Civaux (modélisation 2D (points rouges) vs évaluation 1D).....	62
Figure 70 : Pourcentage mensuel de mesures inférieures au seuil de décision par SMP aval, quand le CNPE surveillé est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, entre janvier 2017 et avril 2021.....	63

Figure 71 : Pourcentage de mesures inférieures au seuil de décision par SMP aval, quand le CNPE surveillé est le principal contributeur à l'activité volumique attendue et qu'elle est supérieure à 5 Bq/L, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	64
Figure 72 : Distribution cumulée du rapport mesure (> SD)modèle 1D quotidien par SMP aval au cours d'un rejet quand le CNPE surveillé est le principal contributeur à cette activité, par classe de débits sur la période de janvier 2017 à avril 2021 (hormis la période jusqu'à fin 2018 pour Saint-Laurent, et la période de février à novembre 2017 pour Dampierre)	64
Figure 73 : Rapport entre les activités mesurées supérieures au SD et les activités moyennes quotidiennes du modèle 1D, par classe de débits et par SMP aval, quand le CNPE surveillé est le principal contributeur à l'activité attendue, sur la période de janvier 2017 à avril 2021 (hormis la période jusqu'à fin 2018 pour Saint-Laurent, et la période de février à novembre 2017 pour Dampierre)	65
Figure 74 : Distributions transversales des CDL modélisées au droit des SMP aval en fonction des classes de débit	66
Figure 75 : Représentation du cours d'eau dans le code CASTEAUR	70
Figure 76 : Illustration du maillage d'un bief au pas d'espace Δx	70
Figure 77 : 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)	74
Figure 78 : Comparaison modèle-mesures des débits de la Loire au niveau des stations HYDRO de calage, sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	76
Figure 79 : Comparaison modèle-mesures des débits de la Vienne au niveau des stations HYDRO de calage, sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	77
Figure 80 : Rejets liquides mensuels en tritium des CNPE du bassin versant de la Loire entre janvier 2017 et avril 2021	78
Figure 81 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Belleville-sur-Loire, sur la période de janvier 2017 à avril 2021	81
Figure 82 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Dampierre-en-Burly, sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	84
Figure 83 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Saint Laurent, sur la période de janvier 2017 à avril 2021	87
Figure 84 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Chinon, sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	90
Figure 85 : Comparaison modèle 1D-mesures des activités volumiques en 3H à la SMP aval du CNPE Civaux, sur la période de janvier 2017 à avril 2021.....	93
Figure 86 : Belleville - Etiage I : Transects du traçage	96
Figure 87 : Belleville - Etiage I : Vue générale du maillage.....	96
Figure 88 : Belleville - Etiage I : Maillage au rejet	98
Figure 89 : Belleville - Etiage I : Transect 100 m aval rejet.....	99
Figure 90 : Belleville - Etiage I : Répartition du flux de rejet aux buses de l'ouvrage	99
Figure 91 : Belleville - Etiage I : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium	99
Figure 92 : Belleville - Etiage II : Transects du traçage	100
Figure 93 : Belleville - Etiage II : activités volumiques pour les flux calibrés vs homogènes aux buses, à 100 m en aval du rejet.....	101
Figure 94 : Belleville - Etiage II : Répartition calibrée des flux de rejet aux buses	101
Figure 95 : Belleville - Etiage II : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium	101
Figure 96 : Belleville - Module I : Transects du traçage	102
Figure 97 : Belleville - Module I : Maillage à l'ouvrage de rejet.....	103

Figure 98 : Belleville - Module I : Répartition du flux de rejet aux buses.....	103
Figure 99 : Belleville - Module I : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium	104
Figure 100 : Belleville - Module II : Transects du traçage	105
Figure 101 : Belleville - Module II : Répartition calibrée des flux de rejet aux buses	105
Figure 102 : Belleville - Module II : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium	106
Figure 103 : Belleville - Section de Maimbray et ses ilots de sable.....	106
Figure 104 : Dampierre - Etiage : Transects du traçage	108
Figure 105 : Dampierre - Etiage : Vue générale du maillage.....	109
Figure 106 : Dampierre - Etiage : Maillage au rejet	110
Figure 107 : Dampierre - Etiage : Répartition du flux de rejet aux buses	111
Figure 108 : Dampierre - Etiage : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium	111
Figure 109 : Dampierre - Module : Répartition du flux de rejet aux buses.....	112
Figure 110 : Dampierre - Module : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium	113
Figure 111 : Saint Laurent - Etiage : Transects du traçage.....	116
Figure 112 : Saint Laurent - Etiage : Vue générale du maillage.....	116
Figure 113 : Saint Laurent - Etiage : Maillage au rejet	118
Figure 114 : Saint Laurent - Etiage : Répartition du flux de rejet aux buses	118
Figure 115 : Saint Laurent - Etiage : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium	119
Figure 116 : Saint Laurent - Module : Transects du traçage	120
Figure 117 : Saint Laurent - Module : Répartition du flux de rejet aux buses	120
Figure 118 : Saint Laurent - Module : Comparaisons modèle/mesures des activités volumiques de tritium	121
Figure 119 : Civaux Etiage I : Biefs modélisés.....	124
Figure 120 : Civaux Etiage I : Profil transversal des CDL au PK 0.1 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L.....	126
Figure 121 : Civaux Etiage I : Comparaison modèle/mesure des CDL.....	127
Figure 122 : Civaux Etiage II : Profil transversal des CDL au PK 0.1 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L.....	128
Figure 123 : Civaux Etiage II : Comparaison modèle/mesure des CDL.....	129
Figure 124 : Civaux Module I : Profil transversal des CDL au PK 0.015 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L.....	130
Figure 125 : Civaux Module I : Comparaison modèle/mesure des CDL	132
Figure 126 : Civaux Module II : Profil transversal des CDL au PK 0.01 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L.....	133
Figure 127 : Civaux Module II : Comparaison modèle/mesure des CDL	134
Figure 128 : Civaux Crue : Profil transversal des CDL au PK 0.01 en fonction de la distance à la rive droite (DRD) adimensionnée par la largeur L.....	135
Figure 129 : Civaux Crue : Comparaison modèle/mesure des CDL	136

Tableaux

Tableau 1 : Décisions ASN applicables aux CNPE de la Loire et de la Vienne	22
Tableau 2 : Valeurs de débits du cours d'eau minimales et maximales permettant un rejet pour les CNPE de la Loire et la Vienne	23
Tableau 3 : Limites de débit de rejet pour chaque CNPE de la Loire et la Vienne	24
Tableau 4 : Niveaux d'activité volumique maximaux prescrits dans le milieu récepteur	25
Tableau 5 : Prélèvements et mesures relatives à la surveillance des eaux de surface en aval des CNPE du bassin versant de la Loire et de la Vienne.....	25
Tableau 6 : Synthèse des paramètres de calcul	72
Tableau 7 : Belleville - Historique des traçages avant 2000.....	94
Tableau 8 : Belleville - Traçages EDF de 2014 à 2017	95
Tableau 9 : Belleville - Images du linéaire et débits de la Loire à Gien.....	95
Tableau 10 : Belleville - Etiage I : Transects du traçage	96
Tableau 11 : Belleville - Etiage I : Paramètres des mailles	97
Tableau 12 : Belleville - Etiage I : Matrice de connectivité	97
Tableau 13 : Belleville - Etiage I : Débits entrants.....	98
Tableau 14 : Belleville - Etiage II : Transects du traçage	100
Tableau 15 : Belleville - Etiage II : Débits entrants	100
Tableau 16 : Belleville - Module I : Transects du traçage.....	102
Tableau 17 : Belleville - Module I : Débits entrants	103
Tableau 18 : Belleville - Module II : Transects du traçage.....	105
Tableau 19 : Belleville - Module II : Débits entrants	105
Tableau 20 : Dampierre : Traçages EDF de 2012 et 2013	106
Tableau 21 : Dampierre - Images Google Earth et débits de la Loire.....	107
Tableau 22 : Dampierre - Etiage : Transects du traçage	108
Tableau 23 : Dampierre - Etiage : Paramètres des mailles	109
Tableau 24 : Dampierre - Etiage : Matrice de connectivité.....	109
Tableau 25 : Dampierre - Etiage : Débits entrants	110
Tableau 26 : Dampierre - Etiage : Débits entrants	112
Tableau 27 : Saint Laurent - Traçages EDF de 2011 et 2012	113
Tableau 28 : Saint Laurent : Images Google Earth et débits de la Loire.....	114
Tableau 29 : Saint Laurent - Etiage : Transects du traçage	116
Tableau 30 : Saint Laurent - Etiage : Paramètres des mailles	117
Tableau 31 : Saint Laurent - Etiage : Matrice de connectivité	117
Tableau 32 : Saint Laurent - Etiage : Débits entrants.....	118
Tableau 33 : Saint Laurent - Module : Transects du traçage.....	120
Tableau 34 : Saint Laurent - Module : Débits entrants	120
Tableau 35 : Caractéristiques des traçages au CNPE de Civaux	122
Tableau 36 : Civaux - Images Google Earth et débits de la Loire	122
Tableau 37 : Civaux Etiage I : Paramètres des biefs.....	125

Tableau 38 : Civaux Etiage I : Matrice de connectivité	125
Tableau 39 : Civaux Etiage I : Données des rejets	126
Tableau 40 : Civaux Etiage II : Données de rejet	128
Tableau 41 : Civaux Module I : Paramètres des biefs	129
Tableau 42 : Civaux Module I : Matrice de connectivité	130
Tableau 43 : Civaux Module I : Données de rejet	131
Tableau 44 : Civaux Module II : Données de rejet	133
Tableau 45 : Civaux Crue : Données de rejet	135

IRSN

Pôle santé et environnement

Direction de l'environnement

E-mail

contact@irsn.fr

N° du rapport

Rapport IRSN 2024-00682

Tous droits réservés IRSN

Décembre 2024

Photo de couverture © IRSN

Autres photos :

Sauf mention contraire, les photographies aériennes / satellitaires reproduites sont issues de Géoportail.



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