
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Estimation du métabolisme aquatique des cours d'eau intermittents

INRAE Rennes
65 rue de Saint-Brieuc,
35000, Rennes



Tuteur entreprise :
Ophélie Fovet et
Rémi Dupas

Tuteur académique :
Stéphane Rodriguez

Léo Boullé
IMA
2024-2025

Remerciements

Je tiens à remercier les personnes qui ont permis une expérience pendant ce stage. Merci à l'équipe de l'UMR SAS de l'INRAE Rennes qui m'a accueilli durant ce stage. Je tiens davantage à remercier Rémi Dupas, Ophélie Fovet, mes encadrants, pour m'avoir accompagné, guidé et conseillé durant ce stage. Merci aussi à Andrés Casanova et Sophie Guillon pour leur temps et leur aide qui m'ont été précieux. J'adresse aussi mes remerciements à Mikaël Fauchaux pour m'avoir instruit sur les logiciels de supports de données et le matériel de terrain et à Céline Bouillis et Pauline Buysse de m'avoir accompagné lors des prélèvements sur le terrain. Merci également à Stéphane Rodriguez, mon tuteur académique, pour son soutien durant ce stage.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	5
Abstract	5
Liste des figures :	7
Liste des abréviations :	7
I-Introduction	8
A-Contexte général.....	8
1)Les cours d'eau intermittents	8
2)Le métabolisme des cours d'eau.....	8
3)Méthode d'estimation du métabolisme des cours d'eau par bilan d'oxygène	9
B-Contexte du travail et problématique	9
C-Hypothèses sur l'estimation du métabolisme	10
II-Matériel et méthodes	12
A-Présentation du site d'étude	12
B-Acquisition des données	14
1)Données d'oxygène.....	14
2)Données de température et d'hauteur d'eau	14
3)Données de lumière	14
4)Données de débits	14
C-Traitement des données	16
1)Traitement des données d'oxygène.....	16
2)Traitement des données de température et de hauteur d'eau	16
3)Traitement des données de lumière	16
4)Obtention des courbes de tarage des bassins versants	17
D-Modélisation.....	19
1)Modèle StreamMetabolizeR	19
2)Critères de validité des données obtenues.....	20
3)Modélisation de l'ombrage	20
III-Résultats.....	22
A-Chroniques d'oxygène dissous obtenues	22
B-Estimations de GPP et ER suite aux modélisations.....	23
C-Effets de l'ombrage sur les estimations de métabolisme	26
IV-Discussions.....	29
A-Effet du gradient d'intermittence.....	29

B-Saisonnalité du métabolisme.....	30
C-Perspectives	30
1)Amélioration de la qualité des données pour une modélisation plus robuste	30
2)Contraindre davantage le coefficient de ré aération k600.....	31
3)Intégrer l’ombrage sur l’année et sur le linéaire	31
V-Retour réflexif sur l’expérience	32
Bibliographie	33
Annexes:	35

Résumé

Le métabolisme des cours d'eau reflète l'équilibre entre la production primaire brute et la respiration écosystémique. Il constitue un indicateur clé du fonctionnement des écosystèmes, permettant de mieux comprendre la dynamique des nutriments et de la matière organique dans les écosystèmes d'eau douce. Comprendre ces processus est particulièrement important dans le contexte du changement climatique, avec l'augmentation de la durée et de la fréquence des sécheresses hydrologiques. Aujourd'hui, un nombre croissant de cours d'eau deviennent intermittents, avec des assèchements saisonniers ou irréguliers, ce qui pose des défis spécifiques pour l'estimation du métabolisme, notamment pendant les périodes sèches et lors de l'épisode de reconnexion hydrologique. L'étude se concentre sur trois petits bassins versants en Bretagne (Ouest de la France) exposés à des degrés variés d'intermittence hydrologique. Nous cherchons à comprendre l'effet de cette intermittence sur le métabolisme des cours d'eau. Nous avons émis l'hypothèse qu'un « pulse » de respiration écosystémique (RE) survient après la reconnexion des tronçons, et que le degré d'intermittence influence cette réponse métabolique. Nous avons appliqué le package StreamMetabolizeR pour estimer le métabolisme quotidien des trois bassins avant et après les périodes d'assèchement. À partir de données haute fréquence d'oxygène dissous, de température de l'eau, de lumière et de débit, ce package utilise un modèle bayésien intégrant un coefficient de ré aération, k_{600} , dépendant du débit, pour calculer la production primaire brute quotidienne et la respiration écosystémique quotidienne. Nos résultats montrent que les trois cours d'eau étaient majoritairement hétérotrophes, caractérisés par une production primaire brute quasi nulle. Nos résultats préliminaires révèlent des variations nettes de la respiration écosystémique entre les trois bassins, mais ces schémas semblent suivre une hiérarchie plus complexe que celle du gradient d'intermittence. Ils suggèrent également qu'à court terme, l'intermittence pourrait ne pas être facteur de contrôle de premier ordre sur les estimations du métabolisme, contrairement aux variations saisonnières.

Abstract

Stream metabolism reflects the balance between gross primary production (GPP) and ecosystem respiration (ER). It is a key indicator of ecosystem functioning, providing insight into nutrient and organic matter dynamics in freshwater ecosystems. Understanding these processes is particularly important in the context of climate change with an increase in the duration and frequency of hydrological droughts. Nowadays an increasing number of streams undergo the process of becoming intermittent with seasonal or irregular drying, and those raise specific challenges for metabolism estimation, especially during dry periods and the post-drying rewetting event. Our study focuses on three small catchments in Brittany (Western France) exposed to various degrees of hydrological intermittency. We aim to understand the effect of this intermittency on stream metabolism. We hypothesized that a pulse in ecosystem respiration (ER) occurs following the reconnection of the reaches, and that the degree of intermittency influences this metabolic response. We applied the StreamMetabolizeR package to estimate daily metabolism of the three catchments pre- and

post-drying periods. Using high-frequency dissolved oxygen, water temperature, light, and discharge data, this package uses a Bayesian model incorporating discharge dependent reaeration coefficient k_600 to calculate daily gross primary production (GPP) and daily ecosystem respiration (ER). Our results showed that all three streams were predominantly heterotrophic, characterized by a near-zero gross primary production (GPP). Our preliminary results reveal distinct variations in ecosystem respiration (ER) among the three catchments, but these patterns appear to follow a more complex path than the simple gradient of intermittence. These results also suggest that intermittency may not have a significant impact at the short time scale on metabolism estimates compared to seasonal variations.

Liste des figures :

Figure 1 : Hypothèse de flush de respiration observé après la reconnexion des systèmes hydrologiques suite aux assecs

Figure 2 : Situation géographique du site d'étude de la Ria d'Etel et des trois bassins versants étudiés

Figure 3 : Fragmentation observée sur l'ensemble des trois bassins versants lors de l'année 2024 (Andrés Casanova, 2025)

Figure 4 : photographie d'une sonde MiniDot sur son support fabriqué par l'UMR SAS

Figure 5 : Graphique représentant la hauteur d'eau à l'exutoire des trois bassins versants et les dates de réalisation des mesures de débit par le SMRE

Figure 6 : Courbes de tarages établies pour chacun des trois bassins versants

Figure 7 : Chronique d'oxygène dissous mesuré sur une période courte à l'exutoire de chacun des bassins versants

Figure 8 : Chronique d'oxygène dissous mesuré sur une année entière à l'exutoire de chacun des bassins versants

Figure 9 : Résultats d'estimation de GPP et ER obtenus entre avril 2024 et juin 2025 après modélisation sur l'ensemble des 3 bassins versants

Figure 10 : Résultats d'estimation de GPP et ER obtenus entre avril 2024 et juin 2025 après modélisation sur l'ensemble des 3 bassins versants selon une médiane mensuelle

Figure 11 : Evolution de GPP, ER et K600 en fonction du débit sur chacun des bassins versants

Figure 12 : Comparaison des résultats de GPP et ER sur le bassin versant de Cochelin en fonction des données de lumières provenant de la station météo de Lorient ou du dispositif HOBO situé à l'exutoire de Cochelin

Figure 13 : Comparaison des données de lumières mesurées à l'exutoire de Cochelin et à la station météo de Lorient

Figure 14 : Résultats finalement obtenus par rapport aux hypothèses de départ

Liste des abréviations :

GPP : Gross Primary Production = production primaire brute

ER : Ecological Respiration = respiration écosystémique

SMRE : Syndicat Mixte de la Ria d'Etel

MOD : Matière organique dissoute

I-Introduction

A-Contexte général

1) Les cours d'eau intermittents

Les cours d'eau intermittents et éphémères représentent environ la moitié du réseau hydrographique mondial, et leur présence devrait encore augmenter avec les changements climatiques globaux en cours (Datry et al., 2012). Ces dernières années, un effort important a porté sur la caractérisation des dynamiques spatio-temporelles de l'intermittence (Sauquet et al., 2021) et sur l'évaluation de ses effets sur les organismes aquatiques et les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du phosphore (Datry et al., 2018). Néanmoins, la majorité des travaux concernent de petits cours d'eau en contextes arides ou méditerranéens ; les régions tempérées humides restent relativement sous-documentées alors que l'on y retrouve de nombreux cours d'eau intermittents et éphémères (Snelder et al., 2013).

La compréhension du fonctionnement des cours d'eau intermittents devient cruciale pour orienter leur gestion et préserver leur biodiversité ainsi que leur intégrité fonctionnelle. Au-delà de leur rôle d'habitat pour de nombreuses espèces, ces milieux constituent aussi, pour des millions de personnes, des sources d'alimentation et parfois les seules ressources en eau pour les usages domestiques et industriels.

2) Le métabolisme des cours d'eau

On appelle métabolisme des cours d'eau l'ensemble des réactions biochimiques de production et de dégradation de la matière organique, ainsi que les flux de nutriments associés, résultant de l'activité photosynthétique et de respiration des organismes aquatiques (Odum, 1956).

La production primaire correspond à la photosynthèse, par laquelle le carbone inorganique est converti en carbone organique grâce à l'eau et à l'énergie lumineuse.



Cette production est assurée par les autotrophes à la base des réseaux trophiques des écosystèmes lotiques, les eaux courantes telles que les ruisseaux, les rivières et les fleuves.

La respiration correspond au processus inverse, il s'agit de l'oxydation du carbone organique en carbone inorganique avec la libération d'énergie utilisable par les organismes hétérotrophes et autotrophes.



On caractérise alors un écosystème par sa production nette d'écosystème (NEP), somme de la production primaire brute (GPP), par convention valeur positive, et de la respiration écosystémique (ER), par convention valeur négative. Si cette valeur de production nette

d'écosystème est inférieure à 0, l'écosystème est hétérotrophe et constitue une source de CO₂ et si celle-ci est supérieure à 0 alors le système est autotrophe et agit comme un puits de CO₂.

3) Méthode d'estimation du métabolisme des cours d'eau par bilan d'oxygène

La dynamique de l'oxygène dans la colonne d'eau est décrite comme la somme de trois termes :

$$dDO/dt = P(t) + R(t) + D(t)$$

Avec :

P(t) la photosynthèse par les autotrophes, qui produit de l'oxygène pendant la période éclairée et piloté par la lumière

R(t) la respiration, consommation de l'oxygène par les organismes hétéro/autotrophes et active en continu

D(t) l'échange d'oxygène à l'interface air-eau, aux conditions ambiantes de température et de pression barométrique. Ce terme peut être positif (ré aération) ou négatif (dégazage) et tend à ramener la concentration vers la saturation avec l'atmosphère (Guillon, 2021). Il s'agit du produit d'un coefficient d'échange K(t) spécifique au dioxygène et dépendant de la température et de l'écart entre la concentration de dioxygène dans l'eau et la concentration de dioxygène à saturation.

$$D(t) = K(t) \times (DO_{sat}(t) - DO(t))$$

Pour calculer le métabolisme journalier dans les cours d'eau, on effectue une modélisation inverse à partir de la première équation. A partir des mesures de la variable de sortie du modèle, c'est-à-dire DO(t), on peut recalculer les variables d'entrées, c'est-à-dire P(t) et R(t).

B-Contexte du travail et problématique

Ce travail s'inscrit dans un stage à l'INRAE de Rennes, au sein de l'UMR SAS (Sol, Agro et hydrosystème, Spatialisation) dans le projet OBTAINER qui s'interroge sur le fonctionnement biogéochimique et au métabolisme des cours d'eau intermittents en contexte tempéré, financé par le CNRS (appel à projet EC2CO) et par la région Bretagne. L'équipe de ce projet est composée de deux chargés de recherche, Rémi Dupas et Ophélie Fovet, mes encadrants de stage et d'un doctorant, Andrés Casanova. La thèse d'Andrés Casanova documente les effets de l'intermittence sur les propriétés physico-chimiques (C-N-P, MOD) dans trois sous-bassins versants de la Ria d'Étel. Ce stage a pour objectif de s'interroger sur l'effet de l'intermittence sur le métabolisme des cours d'eau car on suppose que le métabolisme impacte la dynamique et les flux de nutriments dans les cours d'eau.

Ce stage a pour objectif de répondre à la problématique suivante : Quel est l'effet de l'intermittence sur le métabolisme des cours d'eau intermittents hétérotrophes avec une dynamique temporelle plus variée ?

C-Hypothèses sur l'estimation du métabolisme

Les bassins versants étudiés sont des têtes de bassins versants de méso-échelle situés en contexte tempéré océanique et soumis à différents degrés d'intermittence. Dans les têtes de bassin tempéré, la limitation par la lumière et les apports allochtones de carbone favorisent des bilans annuels hétérotrophes (Bernhardt et al., 2021), ce à quoi l'on pourrait s'attendre ici. De même, la fragmentation du continuum hydrologique et l'augmentation de l'intermittence tendent à accroître l'hétérotrophie en accumulant de la matière organique pendant l'assec et, lors de la reconnexion, des pulses de respiration apparaissent fréquemment (Bernhardt et al., 2021). Plusieurs hypothèses peuvent être émises quant à la caractérisation du métabolisme des bassins versants étudiés par rapport à ces observations faites par Bernhardt et al. La Figure 1 illustre ces hypothèses.

La première hypothèse est que les cours d'eau étudiés seraient majoritairement hétérotrophes, c'est-à-dire avec une production nette d'écosystème inférieure à 0 et donc une respiration écosystémique plus importante que la production primaire brute en moyenne annuelle.

La deuxième hypothèse est que plus un bassin versant est soumis à de la fragmentation et donc un degré d'intermittence élevé, plus son hétérotrophie serait marquée, avec un NEP annuelle plus négative et une respiration écosystémique annuelle plus élevée.

Enfin, la dernière hypothèse est qu'on observerait, après une période de forte fragmentation, à la reconnexion des systèmes hydrologiques, un pic (flush) de respiration écosystémique à l'exutoire dont l'amplitude augmenterait avec la durée de l'assec et avec le degré d'intermittence en amont.

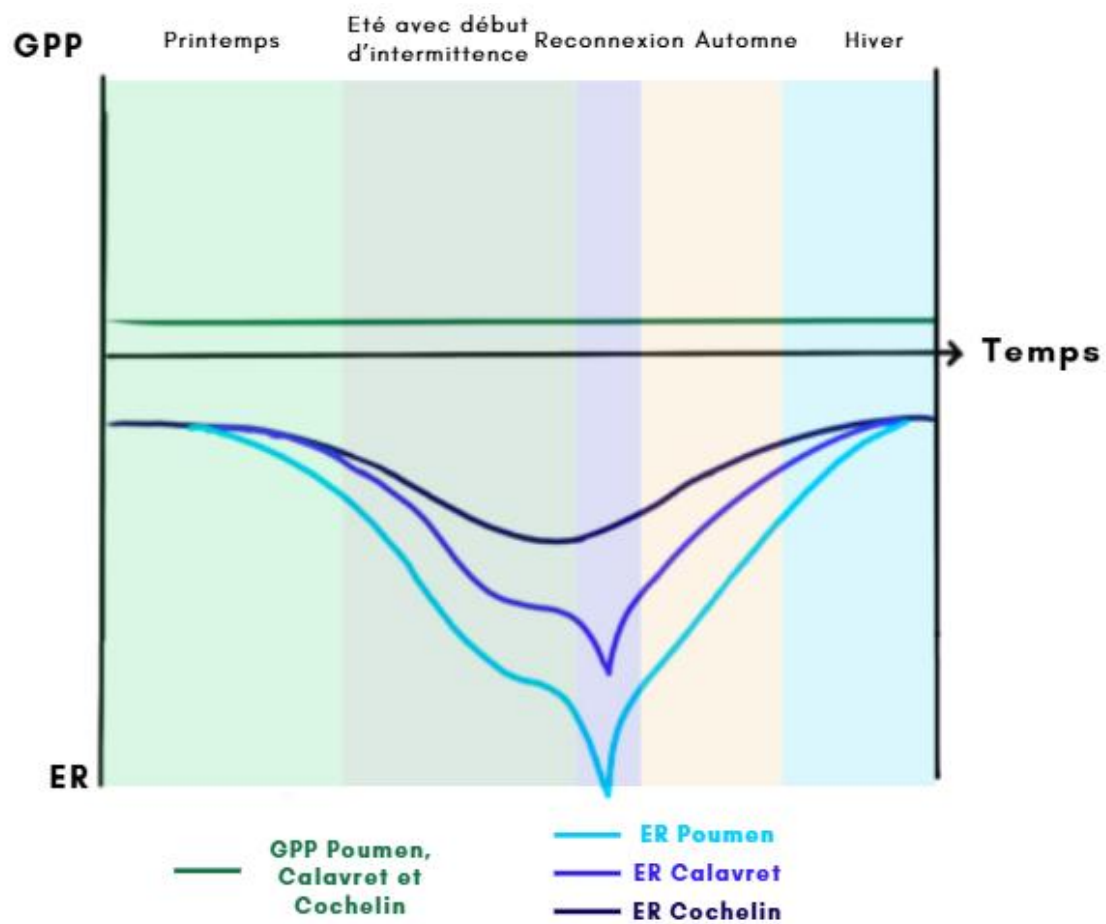


Figure 1: Hypothèse de flush de respiration observé après la reconnexion des systèmes hydrologiques suite aux assecs

II-Matériel et méthodes

A-Présentation du site d'étude

Les trois bassins versants sur lesquels se portent l'étude sont situés dans la Ria d'Étel dans le Morbihan entre Lorient et Auray (Figure 2). Ce sont des têtes de bassins versants de méso-échelle, le bassin versant de Cochelin faisant 23,3 km², 23,7 km² pour le bassin versant du Calavret et 17,7 km² pour celui de Poumen.

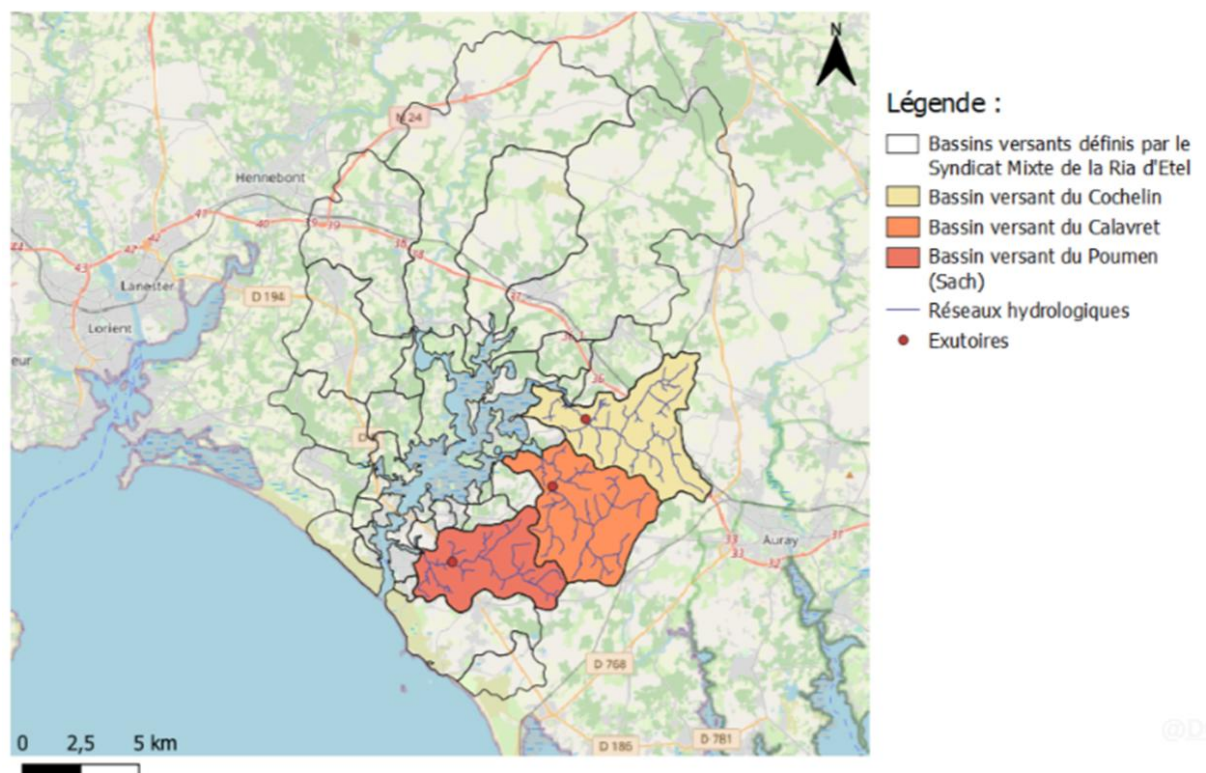


Figure 2: Situation géographique du site d'étude de la Ria d'Étel et des trois bassins versants étudiés (Qgis)

Ces trois bassins versants sont situés en contexte tempéré océanique, à dominance forestière et agricole et sont soumis à différents degrés d'intermittence. En effet, plus on se rapproche de la côte, plus les bassins versants sont soumis à une fragmentation accrue. Pour mesurer cette fragmentation, des dispositifs HOBO sont stationnés dans les différents bras des bassins versants ; il y a 10 stations par bassin versant. Ces dispositifs mesurent en continu la température de l'eau et la luminosité dans l'eau. Lorsque l'on observe des variations journalières très prononcées de la température mesurée, cela nous indique si le dispositif se situe dans de l'eau courante, de l'eau stagnante (mare) ou s'ils sont émergés et donc le bras est assec. La fragmentation est aussi recensée lors des sorties de terrains grâce aux observations visuelles (Figure 3). Ce gradient d'intermittence se définit comme tel : Poumen, le bassin versant le plus à l'Ouest et le plus intermittent, Calavret, situé au centre des deux bassins versants soumis à moins d'intermittence, et enfin Cochelin, le bassin versant le plus à

l'Est et le moins intermittent des trois bassins versants. Au cours de l'année 2024, qui reste une année très humide, aucun point de Cochelin n'était défini comme étant assec.

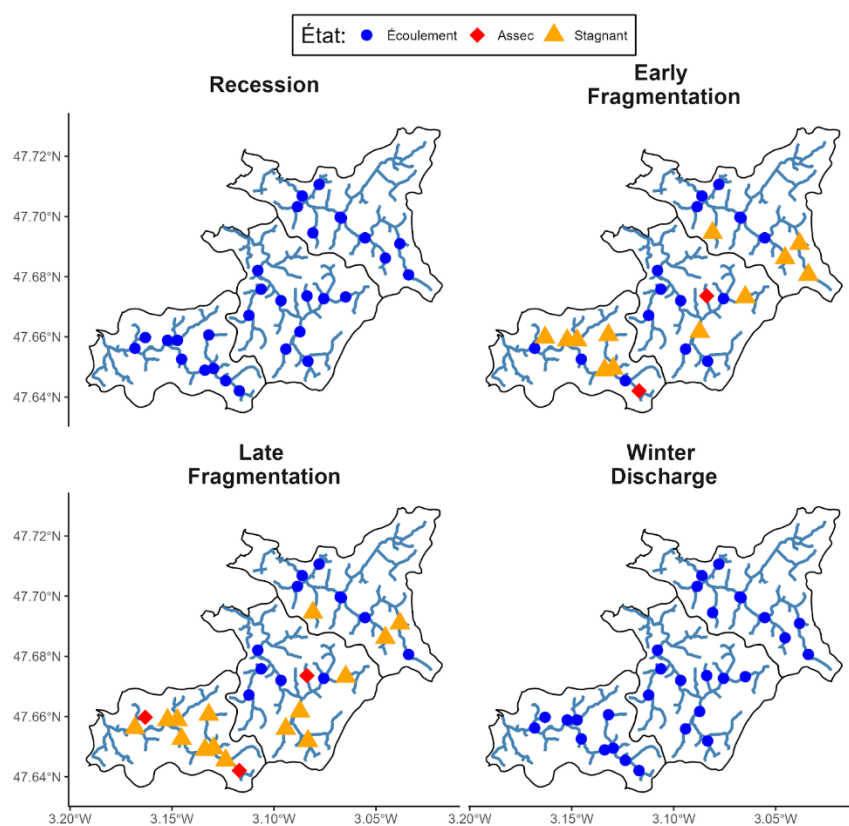


Figure 3: Fragmentation observée sur l'ensemble des trois bassins versants lors de l'année 2024 (Andrés Casanova, 2025)

B-Acquisition des données

1)Données d'oxygène

A chacun des exutoires, une sonde MiniDot Logger (Figure 4) enregistre en continu la concentration en oxygène dissous en mg/L avec une résolution de 0,01 mg/L et la saturation en oxygène dissous avec un pas de temps d'une minute grâce à une mesure optique par luminescence. Ces sondes sont en place à chaque exutoire depuis le 17 avril 2024 et sont positionnées dans le sens du courant pour éviter le dépôt de branchages et d'autres débris avec le courant. Afin de récupérer les données, il est nécessaire d'aller directement sur le site.



Figure 4: Photographie d'une sonde MiniDot sur son support fabriqué par l'UMR SAS

2)Données de température et d'hauteur d'eau

Aux exutoires, sont également installés des CTD Divers, qui mesurent la hauteur d'eau et la température de l'eau toutes les 15 minutes. Ces dispositifs ont été installés entre le 20 mars 2024 et le 27 mars 2024 selon les sites. Ces données permettent d'estimer un débit, nécessaire pour le calcul du métabolisme des cours d'eau.

3)Données de lumière

Pour ce qui est des données de lumières, celles-ci proviennent de deux sources différentes. D'une part, la donnée qui sera utilisée lors des modélisations de métabolisme provient de la station météo de Lorient, donnée en UTC et en J/cm². D'autre part, des capteurs HOBO, placés sous le couvert arboré aux trois exutoires mesurent la lumière en lux depuis octobre 2024 à Cochelin et mars 2025 à Poumen et Calavret. Les mesures locales des dispositifs HOBO permettent de capter l'effet de l'ombrage propre à chaque exutoire.

4)Données de débits

Les données de jaugeages manuels sont récupérées mensuellement auprès du Syndicat mixte de la Ria d'Etel (SMRE). Ces données de jaugeages sont ensuite utilisées afin de réaliser des courbes de tarage pour chacun des trois bassins versants en associant chaque mesure de

jaugeage à une hauteur d'eau mesurée au point de jaugeage. Ces informations hydrologiques permettent de contraindre les relations entre l'hydraulique des cours d'eau et le coefficient de ré aération k_{600} dans la modélisation du métabolisme.

C-Traitement des données

1) Traitement des données d'oxygène

Les données récoltées par les sondes MiniDot sont ensuite transposées vers un logiciel de gestion de données hydrométriques HYDRAS. Directement sur ce logiciel, il est possible de corriger certains artéfacts dus au relevage des capteurs. Cela permet d'avoir un jeu de données par la suite homogène et prêt à être utilisé. Comme les données récoltées sont au pas de temps d'une minute, il est ensuite nécessaire d'agréger les données de concentration d'oxygène dissous et de saturation en oxygène au pas de temps de 15 minutes pour que celles-ci soient prêtes pour la modélisation.

2) Traitement des données de température et de hauteur d'eau

Les données obtenues de températures et de hauteur d'eau grâce au CTD divers sont déjà dans le bon format et prêtes à être exploitées pour la modélisation. Les seules modifications qu'il reste à faire est de corriger, tout comme pour les sondes à oxygène, tout artéfact lors du relevage des capteurs. Sur la Figure 5, on peut observer les différentes hauteurs d'eau à l'exutoire de chacun des bassins versants et notamment les très faibles hauteurs d'eau, lors des périodes de fragmentation.

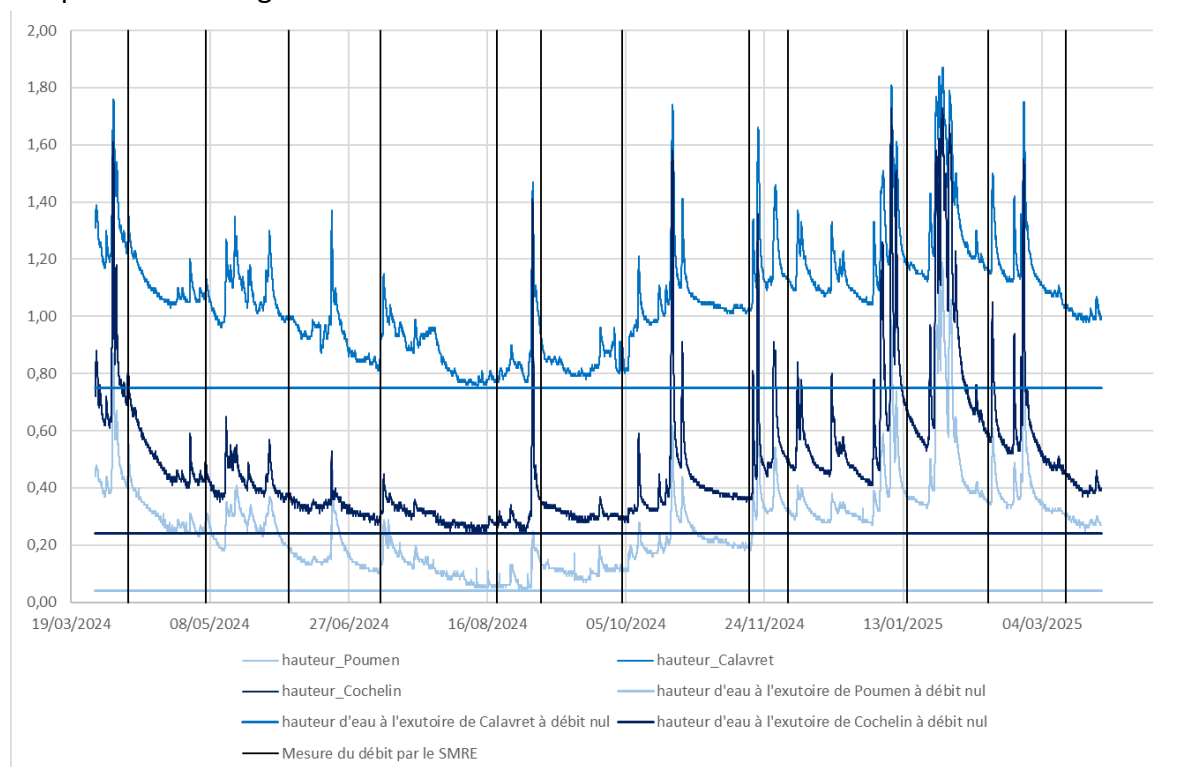


Figure 5: Graphique représentant la hauteur d'eau à l'exutoire des trois bassins versants et les dates de réalisation des mesures de débit par le SMRE

3) Traitement des données de lumière

Pour les modélisations de métabolisme, étant nécessaire d'avoir un couvert de la lumière sur toute la période simulée, la donnée de lumière provenant de la station météo de Lorient a été utilisée, comme les dispositifs HOBO ont été installés trop tard. Pour utiliser cette donnée dans le modèle d'estimation de métabolisme, il a fallu effectuer un changement d'unité pour passer à des micromoles de photons/m²/s, unité requise dans le modèle StremMetabolizeR et effectuer une interpolation linéaire des données horaires pour obtenir, tout comme pour l'oxygène dissous et la hauteur d'eau, des données à un pas de temps de 15 minutes.

4) Obtention des courbes de tarage des bassins versants

Les courbes de tarage de chacun des bassins versants (Figure 6) ont été établies à partir de ces données de hauteurs d'eau à l'exutoire, corrélées aux mesures de débit effectuées par le SMRE lors de leurs campagnes mensuelles. Afin de ne considérer que la charge hydraulique attribuable à l'écoulement dans le cours d'eau, a été déduite la hauteur d'eau minimale observée à chaque exutoire. Cette correction permet aussi d'obtenir une courbe de tarage passant par l'origine. Une fonction de type puissance a été établie à la courbe de tendance afin d'obtenir seulement des valeurs positives de débit.

Le calcul des débits est effectué en appliquant les équations issues des courbes de tarage aux hauteurs d'eau mesurées. Toutefois, ces courbes ont été établies à partir des mesures de débit réalisées par le SMRE lors de campagnes mensuelles, lesquelles n'incluent pas de conditions de crue, c'est-à-dire des situations de forte hauteur d'eau. En conséquence, il est préconisé de limiter les calculs à une valeur seuil correspondant au débit maximal mesuré par le SMRE. Au-delà de cette valeur, la validité de la courbe de tarage devient incertaine, et les débits estimés risquent d'être surestimés. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à une gamme de débit plutôt faible mais si l'on voulait estimer des débits plus importants il serait nécessaire de réaliser des mesures de débits lors de périodes de crues et d'établir une autre courbe de tarage adaptée à ces conditions hydrologiques extrêmes.

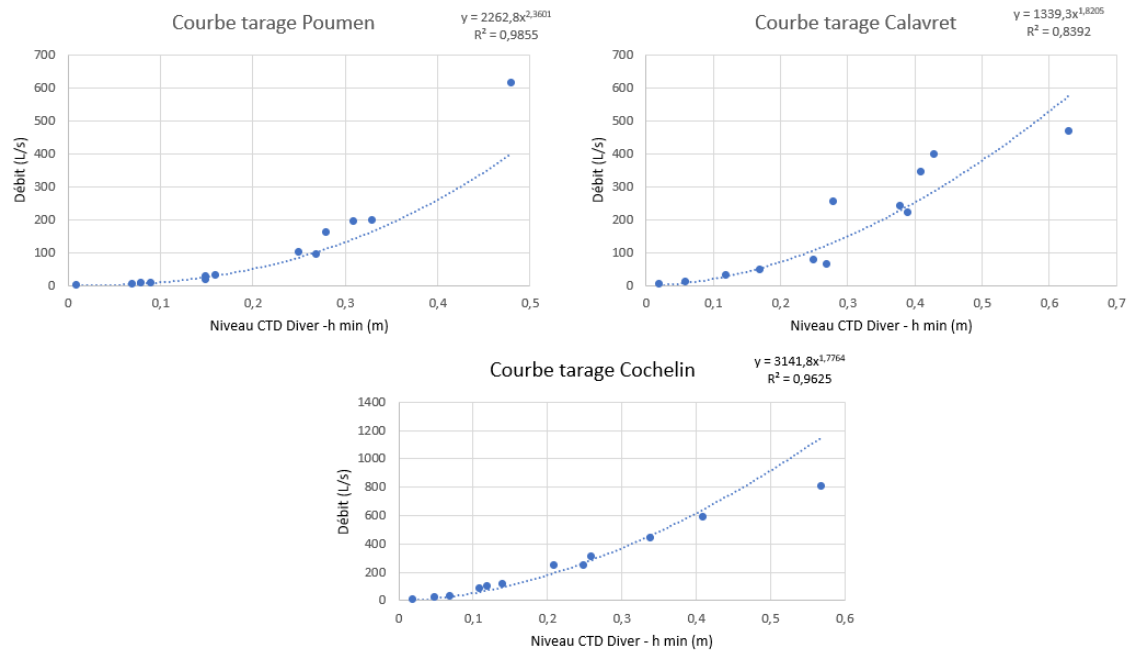


Figure 6: Courbes de tarages établies pour chacun des trois bassins versants

D-Modélisation

1)Modèle StreamMetabolizeR

Les modélisations ont été effectuées à l'aide d'un package R open source conçu par Appling et al, 2018 : StreamMetabolizeR. Ce package R permet d'estimer les flux métaboliques (production primaire brute GPP, respiration écosystémique ER et coefficient de ré aération K600) dans les écosystèmes aquatiques à partir de données haute fréquence. Il repose sur l'application d'un modèle de bilan d'oxygène dissous intégrant la photosynthèse, la respiration et la ré aération. L'utilisateur doit fournir des séries temporelles continues, au pas de temps de 15 minutes, de concentration en oxygène dissous, de saturation en oxygène, de température, d'irradiance, de hauteur d'eau et, facultativement, de débit (Q). Le package propose plusieurs types de modèles, dont les plus courants sont les modèles bayésiens. Le modèle bayésien utilise l'interface RStan, qui implémente des algorithmes MCMC (Markov Chain Monte Carlo), pour échantillonner la distribution a posteriori des paramètres à partir de distributions a priori définies par l'utilisateur (normales pour GPP et ER et relationnelles pour K600). Quatre chaînes indépendantes sont générées par paramètre, avec des points de départ distincts, et sont itérées plusieurs milliers de fois. Par défaut, 500 itérations sont utilisées comme burn-in pour permettre aux chaînes de converger, puis 500 itérations sont conservées pour l'estimation finale. Ici lors des modélisations réalisées, afin d'avoir des résultats les plus précis possibles, ont été générée 1000 itérations de burn-in puis 1000 itérations conservées pour l'estimation finale. À chaque itération, le modèle simule la concentration d'oxygène dissous attendue en fonction des valeurs courantes de production primaire brute (GPP), de respiration écosystémique (ER) et du taux de ré aération (K600), puis ajuste ces paramètres pour minimiser la différence entre la concentration d'oxygène dissous simulée et la concentration d'oxygène dissous observée. Le package permet également de relier K600 au débit via une relation paramétrée, ce qui permet d'améliorer la robustesse de l'estimation dans des systèmes dynamiques. Dans notre étude, lors des modélisations, nous avons décidé de relier ce k600 aux débits estimés grâce aux courbes de tarages de chacun des bassins versants afin de contraindre un maximum le modèle. Il a été établi de simuler les estimations sur les périodes les plus longues possibles afin que la relation entre le k600 et le débit puisse être contrainte sur une gamme de données plus importante. Lors des tests effectués on remarque que sur une même période, si l'on simule avec un jeu de données plus ou moins long, les résultats en sortie peuvent être considérablement importants. Certaines études se penchent plutôt sur des périodes de simulations longues, s'étalant sur une année entière (Lopez-Royo et al., 2025) et d'autres sur des périodes plus courtes de simulation, de seulement quelques jours ou semaines (Appling et al., 2018).

En sortie, StreamMetabolizeR fournit des résumés statistiques (moyenne et intervalle de crédibilité) des paramètres ainsi que les valeurs estimées de ces paramètres (production

primaire brute journalière, respiration écosystémique journalière et coefficient de ré aération journalier.

2) Critères de validité des données obtenues

Afin d'évaluer la qualité de la modélisation sont utilisés plusieurs critères de validité des résultats. Un diagnostic de convergence de Gelman-Rubin, Rhat (Gelman-Rubin, 1992) est calculé pour chaque paramètre chaque jour modélisé. L'estimation pour chaque jour est considéré fiable pour un paramètre lorsque le Rhat se rapproche le plus possible de 1. Ici, afin que la valeur du paramètre soit conservée, le Rhat journalier de chaque paramètre doit être compris entre 1 et 1,1. Si ce critère de convergence est trop élevé, cela indique une modélisation peu performante et peu fiable.

D'autres critères de validité sont aussi calculés comme la RMSE et la MAE et le R² entre la concentration d'oxygène dissous simulée par le modèle et celle observée. La MAE permet de calculer la moyenne des écarts absolus entre les valeurs de concentrations d'oxygène dissous observées et celles simulées. La RMSE, elle, permet de calculer la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts entre les concentrations d'oxygène dissous observées et celles simulées. Plus les valeurs de MAE et RMSE sont petites plus la modélisation peut être considérée comme fiable. Il a été établi que lorsque R² était supérieur à 0,75 et MAE et RMSE inférieures à 0,2 mg O₂/L cela indiquait un bon ajustement entre les courbes de concentrations d'oxygène dissous observées et simulées (Bernal et al., 2022).

Enfin, lorsque le modèle retourne des valeurs négatives de production primaire brute ou des valeurs positives de respiration écosystémique, les jours associés à celles-ci sont retirés post-modélisation car ce sont des valeurs considérées comme aberrantes.

Seuls les jours modélisés répondants à tous ces différents critères sont considérés comme recevables et gardés pour l'interprétation des résultats.

3) Modélisation de l'ombrage

Les données de lumière qui ont été utilisées lors de la modélisation du métabolisme sont celles issues de la station météo de Lorient. Cependant, comme il s'agit d'une station météo, celle-ci n'est pas du tout influencée par les ombrages qui peuvent affecter les différents bassins versants. De même, Lorient, même en étant la station météo la plus proche du site d'étude, reste éloignée des bassins versants. Comme des mesures de lumière sont effectuées depuis octobre 2024 sur le bassin versant de Cochelin par le dispositif HOBO à l'exutoire du bassin versant, une comparaison d'estimation du métabolisme sur une même période avec les données de lumière mesurées sous les arbres par le dispositif HOBO et celles issues de la station météo de Lorient est intéressante pour voir si l'ombrage peut avoir un effet significatif sur la modélisation du métabolisme, notamment sur les résultats de production primaire brute, là où la lumière risque d'avoir une influence. C'est pourquoi nous avons décidé de

mettre en place cette comparaison pour déterminer l'impact de l'ombrage sur le métabolisme.

III-Résultats

A-Chroniques d'oxygène dissous obtenues

Les chroniques d'oxygène dissous sur une courte période (Figure 7) permettent de nous rendre compte de la variabilité jour/nuit de l'oxygène dissous. On remarque ici que la dynamique diurne est similaire sur les trois stations mais sur Cochelin, les concentrations en oxygène dissous sont plus importantes et la variabilité quotidienne est plus marquée.

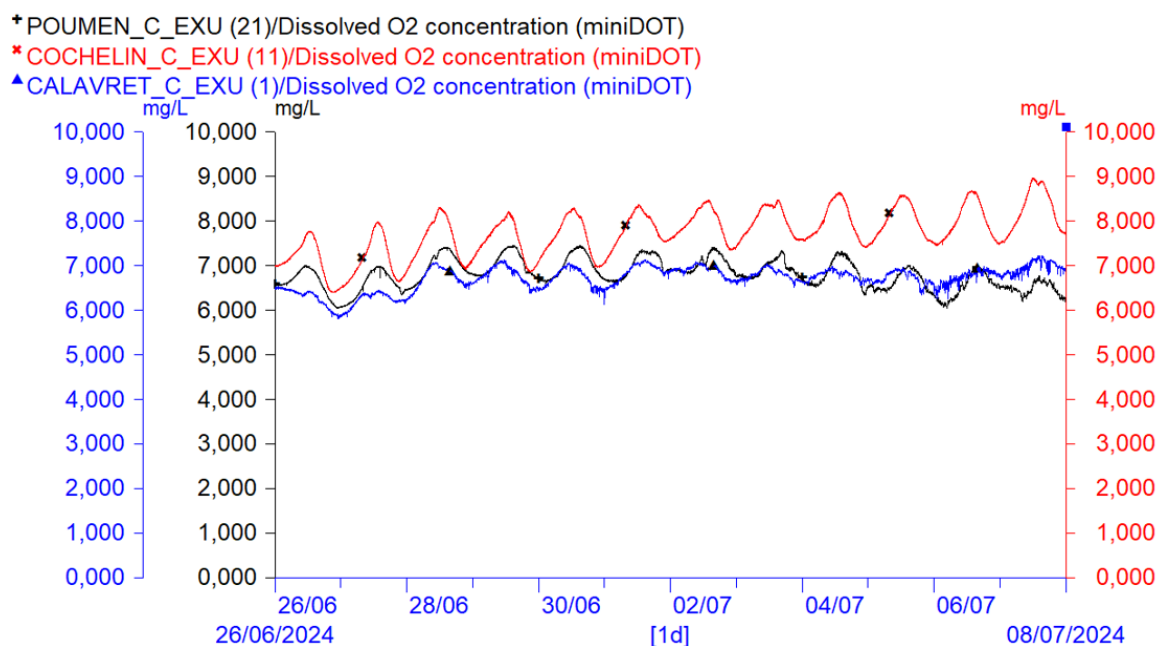


Figure 7: Chronique d'oxygène dissous mesuré sur une période courte à l'exutoire de chacun des bassins versants

Si l'on s'intéresse aux chroniques d'oxygène dissous sur une année entière (Figure 8), on peut s'apercevoir que sur l'ensemble des trois bassins versants il y a une baisse moyenne de la concentration en oxygène dissous lors de la période estivale et une augmentation lors de la période hivernale. On remarque aussi, sur Poumen et Calavret, des épisodes sévères d'anoxie pendant le mois d'août et le mois de septembre marquant les périodes d'assecs et d'intermittence élevée.

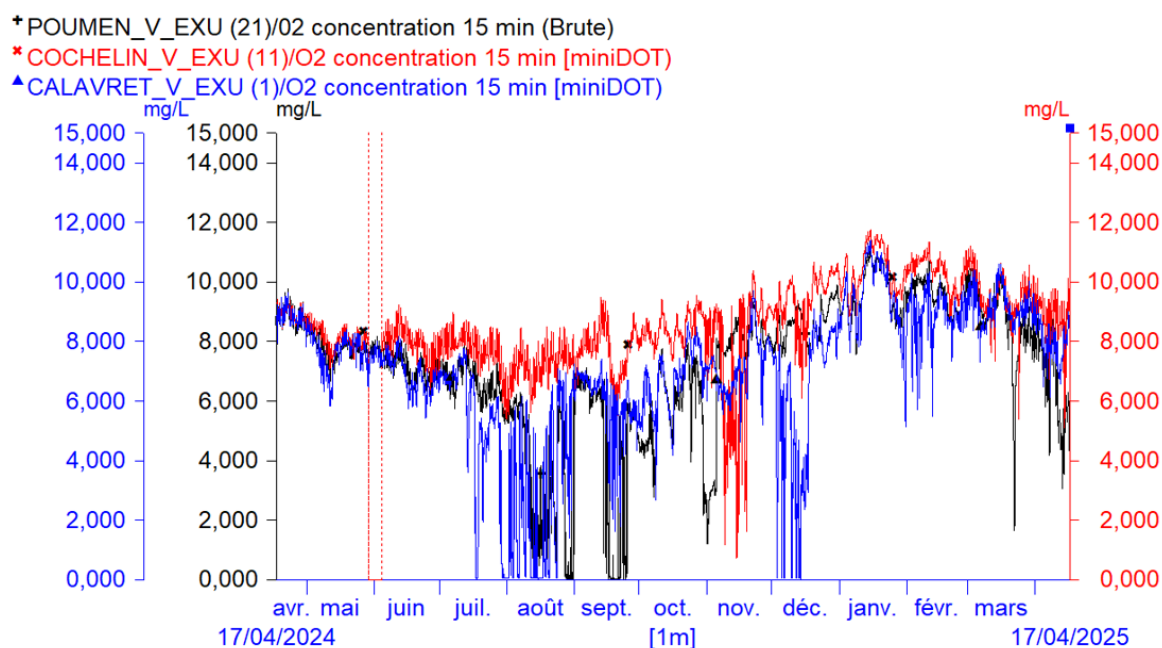


Figure 8: Chronique d'oxygène dissous mesuré sur une année entière à l'exutoire de chacun des bassins versants

B-Estimations de GPP et ER suite aux modélisations

Après modélisation avec en entrée des jeux de données complets, les données obtenues sont soumises aux critères de validité qui ont été décrits en amont, c'est-à-dire : $1 < R_{\text{hat GPP, ER et K600}} < 1,1$; $R^2 > 0,7$; $\text{MAE et RMSE} < 0,2$. Une fois toutes ces conditions remplies, les données sont considérées comme bonnes et recevables. On remarque tout de suite (Figure 9) que ce tri supprime un nombre considérable de données en fonction des différents bassins versants. Néanmoins ce tri permet de retirer les jours où les données de bases mesurées par les sondes n'étaient pas fiables. En effet on remarque bien que les périodes pendant lesquelles les sondes à oxygène MiniDOT mesuraient des données erronées ou relativement anormales, comme la période en août pendant l'assec, ont été enlevées des résultats. De même, on remarque que ce tri a permis de retirer les jours où les débits issus des courbes de tarage sortaient de la gamme de débit acceptable. En effet, on observe très peu de données sur certains bassins versants pendant la période hivernale là où les débits sont les plus forts. Sur 427 jours modélisés sur le bassin versant de Poumen, il en reste seulement 164 avec des données exploitables ; sur 426 jours modélisés sur Calavret il ne reste que 70 jours de données et sur 428 jours modélisés sur Cochelin, il reste 191 jours de données. Le manque de données propres et d'estimation du débit impacte les résultats obtenus mais ceci n'est pas anodin car on retrouve dans la littérature des cas similaires où, afin de garantir une validité des données et des résultats, des trous de données sont observés (Lopez-Rojo et al., 2025).

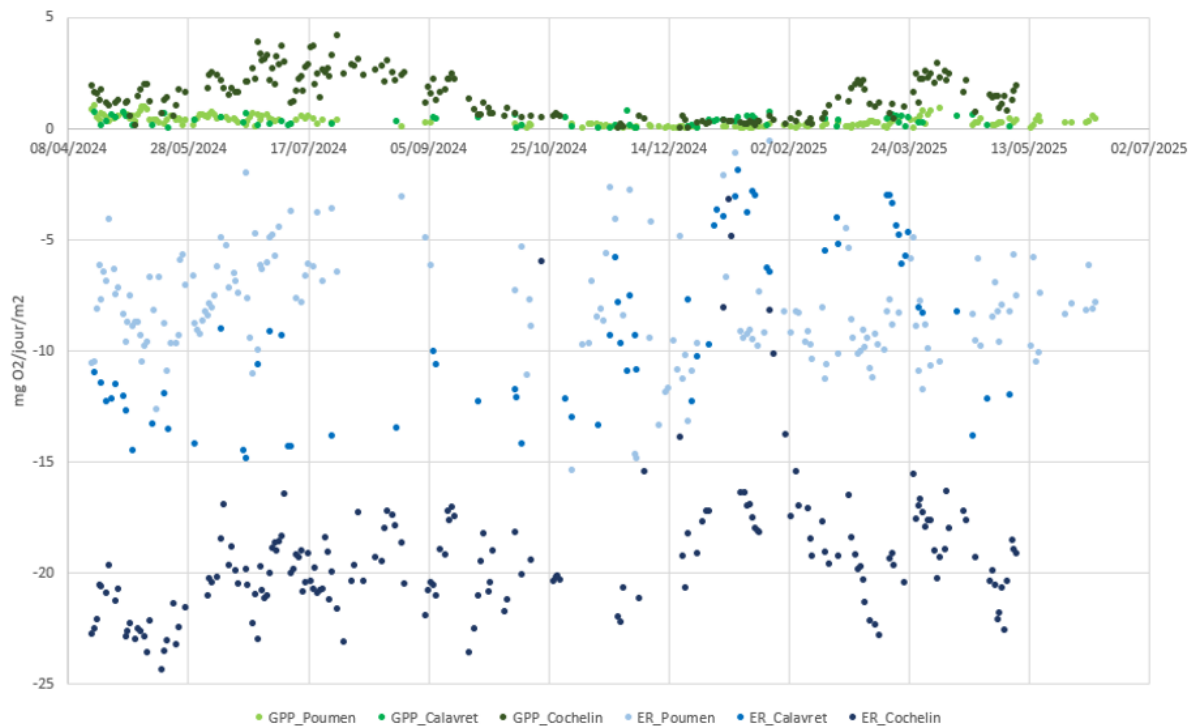


Figure 9: Résultats d'estimation de GPP et ER obtenus entre avril 2024 et juin 2025 après modélisation sur l'ensemble des 3 bassins versants

Afin de se rendre compte de l'allure générale du métabolisme sur chacun des trois bassins versants et avec les données restantes, a été réalisée cette même figure mais en prenant en compte une médiane mensuelle (Figure 10). Cette figure permet de se rendre compte de l'aspect plus global de l'estimation du métabolisme et de faire apparaître certaines saisonnalités notamment sur Cochelin où l'on peut apercevoir une augmentation de la production primaire brute (GPP) aux printemps 2024 et 2025.

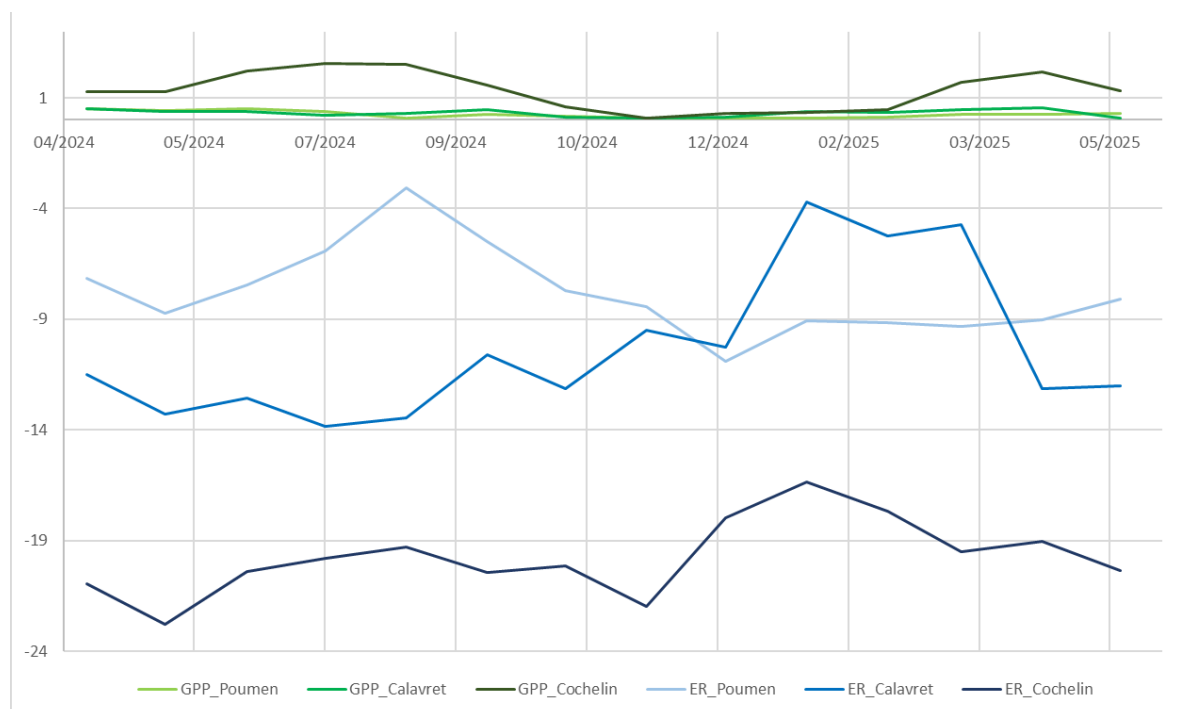


Figure 10: Résultats d'estimation de GPP et ER obtenus entre avril 2024 et juin 2025 après modélisation sur l'ensemble des 3 bassins versants selon une médiane mensuelle

On observe à l'issue du modèle une forte relation entre la respiration écosystémique et le coefficient de ré aération k_{600} (Figure 11). En effet, en fonction du débit, la respiration écosystémique et le coefficient de ré aération évoluent de la même manière. Ceci peut poser problème lors de l'estimation du métabolisme car cette équifinalité empêche d'identifier correctement les valeurs des paramètres du métabolisme, la production primaire brute, la respiration écosystémique et le coefficient de ré aération. Si le coefficient de ré aération compense la respiration écosystémique, le modèle peut estimer une respiration trop forte ou trop faible alors que c'est le coefficient de ré aération qui a changé et inversement. Malgré cela, ce phénomène d'équifinalité et de compensation s'observe souvent dans les cours d'eau non pérennes (Lopez-Rojo et al., 2025).



Figure 11: Evolution de GPP, ER et K600 en fonction du débit sur chacun des bassins versants

C-Effets de l'ombrage sur les estimations de métabolisme

Afin de se rendre compte de l'importance de l'ombrage, le métabolisme a été calculé sur Cochelin selon deux sources de lumière différentes. D'une part avec les données issues de la station météo de Lorient et d'autre part par le dispositif HOBO situé sous des branchages à l'exutoire de Cochelin. Sur les périodes comparables (Figure 12), il n'y a pas de réelle différence entre les estimations avec les données de la station de Lorient et celles in-situ si ce n'est un décalage entre les deux courbes en termes de respiration écosystémique, avec une respiration plus élevée avec les données de la station de Lorient. Cependant, lorsque l'on s'intéresse à la production primaire brute, là où la lumière va le plus avoir d'influence, on remarque qu'au printemps 2025 la production primaire brute est plus faible lorsque le métabolisme est calculé avec le dispositif in-situ à l'ombre. Cette différence d'ombrage a donc une influence sur l'estimation du métabolisme et notamment la production primaire brute.



Figure 12: Comparaison des résultats de GPP et ER sur le bassin versant de Cochelin en fonction des données de lumières provenant de la station météo de Lorient ou du dispositif HOBO situé à l'exutoire de Cochelin

Pour mieux analyser cette différence entre les données issues de la station météo de Lorient et celles du dispositif HOBO, on peut comparer la luminosité moyenne par semaine afin de voir l'influence des saisons et donc de l'ombrage sur ces données de lumière (Figure 13). On remarque que pendant la période hivernale et donc sans feuilles, les données de lumière sont très similaires et suivent presque un ratio 1 :1. Cependant, lorsque l'on se rapproche du printemps et de l'été, la luminosité mesurée par les dispositifs HOBO sous les arbres est bien moins importante que celle mesurée à la station de Lorient. C'est cette différence qui va impacter la modélisation de production primaire brute dans l'estimation du métabolisme. Néanmoins, même si les différences entre les deux simulations avec les données issues de la station de Lorient et celles mesurées in-situ sont notables, celles-ci restent minimales par rapport à la différence de production primaire brute (GPP) et respiration écosystémique (ER) entre les bassins versants (figure 10). La hiérarchie que l'on observe donc entre les bassins versants reste inchangée et n'est pas affectée par ces différences de mesure de luminosité.

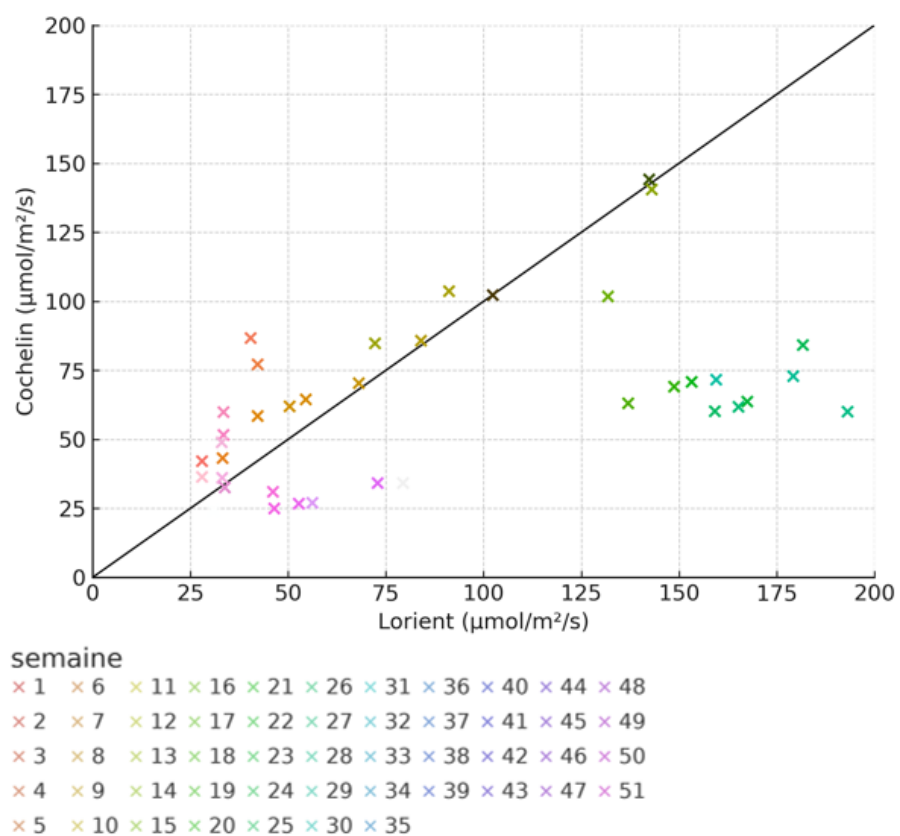


Figure 13: Comparaison des données de lumière mesurées à l'exutoire de Cochelin et à la station météo de Lorient

IV-Discussions

Si l'on reprend la figure de nos hypothèses (Figure 1), une fois les résultats obtenus et après modélisation, celle-ci ressemblerait plutôt à cette nouvelle figure (Figure 14), où finalement nous obtenons des résultats différents de ceux attendus pour deux de nos hypothèses mais l'hétérotrophie globale sur les trois bassins versants est bien observée.

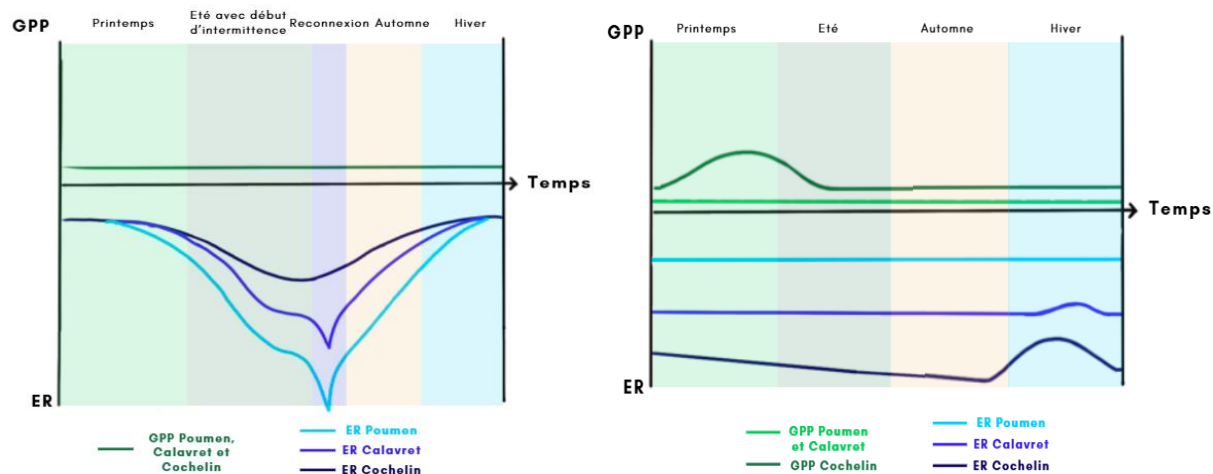


Figure 14: Résultats finalement obtenus par rapport aux hypothèses de départ

A-Effet du gradient d'intermittence

Dans l'ensemble, confirmant l'hypothèse 1, les trois cours d'eau sont majoritairement hétérotrophes avec des valeurs de production primaire faibles comme attendu. Ce résultat coïncide avec ceux obtenus dans l'étude de Bernhardt et al. (2021) qui stipule que dans les têtes de bassins tempérés, la limitation par la lumière et les apports allochtones de carbone favorisent des bilans annuels hétérotrophes. On observe toutefois un léger gradient de productivité avec Cochelin présentant un peu plus de production autotrophe que les deux autres sites, Calavret et Poumen, où la production primaire reste très proche de zéro.

Contrairement à l'hypothèse 2 selon laquelle la respiration devrait augmenter avec l'intensité d'intermittence des bassins versants, les données issues des modélisations montrent ici un classement inversé. En effet, la respiration est plus élevée annuellement à Cochelin, puis à Calavret et enfin à Poumen contrairement au schéma attendu où celle-ci aurait été plus forte à Poumen, là où l'intermittence est la plus marquée. Dans les études menées sur des cours d'eau intermittents, la fragmentation du continuum hydrologique et l'augmentation de l'intermittence tendent à accroître l'hétérotrophie (Bernhardt et al., 2021). Ici, le gradient d'intermittence semble donc être corrélé avec la respiration mais pas dans le sens attendu. Ce gradient d'intermittence étant corrélé spatialement à d'autres propriétés des bassins versants (topographie, couverture forestière, etc), il est difficile avec ces données d'identifier les facteurs de contrôle influençant le métabolisme.

B-Saisonnalité du métabolisme

Finalement, une saisonnalité de la production primaire brute est mise en évidence à Cochelin, avec un pic de production au printemps, tandis que celle-ci demeure nulle ou indiscernable sur les bassins versants de Calavret et de Poumen. Cette saisonnalité s'observe sur Cochelin par une production primaire brute accrue au printemps, où les conditions de température et de lumière sont favorables à cette production. De même en amont du bassin versant de Cochelin, la présence d'un plan d'eau pourrait aussi expliquer cette production primaire observée. Sur les bassins versants de Calavret et Poumen, le réseau hydrologique est probablement plus ombragé, avec des espèces feuillues tout le long de l'année comme des conifères, et cela réduirait la production primaire brute potentielle.

Contrairement à l'hypothèse 3 de flush de respiration, aucun pic de respiration écosystémique n'est clairement mis en évidence ici après la reprise des écoulements (Figure 9). Dans des études menées sur des cours d'eau intermittents dans le bassin versant de l'Albarine (Lopez-Rojo et al., 2025), à la remise en eau des tronçons intermittents, ils observent bel et bien ce « flush » net de respiration écosystémique. Ce pic de respiration survient en moyenne dans les 3 jours après la reprise des écoulements. Dans notre cas, cette non-détection peut s'expliquer par une qualité de données hétérogène lors des phases d'assecs et de reprises sur les différents bassins versants ou par une difficulté plus générale d'observer ce phénomène de pic de respiration sur des cours d'eau comme ceux étudiés. On observe aussi la possibilité d'une saisonnalité de la respiration écosystémique en hiver sur les deux bassins versants de Cochelin et de Calavret, avec une diminution de celle-ci mais on se base ici sur un nombre très faible de valeurs disponibles d'estimation de respiration écosystémique en période hivernale ce qui limite cette interprétation. Une année supplémentaire d'observations avec une meilleure couverture de données lors de cette période hivernale serait nécessaire pour conjecturer cette saisonnalité hivernale sur ces deux bassins versants.

C-Perspectives

1) Amélioration de la qualité des données pour une modélisation plus robuste

Afin de réduire l'incertitude des estimations de production primaire brute, de respiration écosystémique et du coefficient de ré aération et le tri trop important post-modélisation, il serait important d'avoir un jeu de données plus homogène. Cela impliquerait un entretien et nettoyage plus fréquent des capteurs afin de limiter les fausses mesures et le moment où les capteurs sont couverts de sédiments. Il faudrait aussi prêter attention lors de la reprise des écoulements pour s'assurer que le matériel est opérationnel si l'on veut observer plus attentivement ce flush de respiration après une reprise des écoulements.

2) Contraindre davantage le coefficient de ré aération k600

Il pourrait être intéressant de compléter les modélisations par des calculs alternatifs du k600 afin de restreindre davantage ce coefficient de ré aération. Cela peut s'effectuer par des mesures in situ ponctuelles de ce coefficient de ré aération avec une chambre flottante ou des traceurs inertes pour ancrer un ordre de grandeur de ce coefficient ou en faisant des mesures approximatives de ce coefficient grâce à des relations hydrauliques issues de la littérature, en particulier les formules empiriques de Raymond et al. (2012). Cet objectif de réduire l'incertitude autour de ce coefficient de ré aération permettrait d'obtenir des estimations de respiration écosystémique plus fiables et de réduire ce risque d'équifinalité notamment dans les cours d'eau intermittents.

3) Intégrer l'ombrage sur l'année et sur le linéaire

La lumière joue un rôle important sur l'estimation de la production primaire brute et son estimation locale est donc essentielle. Il pourrait être intéressant d'établir une fonction de transfert entre le rayonnement global mesuré à la station météo de Lorient et les mesures faites par les dispositifs HOBO aux différents exutoires. Pour cela il serait nécessaire de disposer d'au moins un cycle annuel complet de données HOBO sous couvert végétal pour établir une relation entre ces deux méthodes de mesures. Il pourrait également être intéressant de s'interroger sur la dimension longitudinale avec des capteurs HOBO supplémentaires le long du linéaire afin de capturer l'hétérogénéité de l'ombrage sur l'ensemble du linéaire. A terme, cette intégration pourrait permettre, surtout sur le bassin versant de Cochelin car c'est le seul où l'on observe une réelle production primaire brute, de mieux contraindre en sortie de modélisation cette production primaire brute et donc, par la même occasion, réduire l'équifinalité avec la respiration écosystémique et le coefficient de ré aération.

V-Retour réflexif sur l'expérience

Ce stage a été d'une grande opportunité pour découvrir le domaine de la recherche et d'approfondir encore plus mes connaissances sur les systèmes d'eau lotiques. Réalisé dans une structure assez importante et multidisciplinaire, ce stage m'a permis de côtoyer de nombreux professionnels aux profils divers et variés notamment dans des domaines tout autres que l'hydrologie.

Durant ce stage, j'ai été énormément sollicité à utiliser le logiciel de programmation R, ce qui a été bénéfique pour moi car en école d'ingénieur nous n'avons pas du tout appris à maîtriser ce langage aujourd'hui presque indispensable. De même j'ai eu l'opportunité d'aller plusieurs fois sur le terrain pour collecter des données et réaliser des échantillonnages, ce qui est toujours un plus dans l'apprentissage de nouvelles compétences.

Outre les compétences techniques, ce stage m'a aussi permis de me familiariser avec la gestion de projet dans le milieu professionnel. De même participer à des réunions entre différents organismes comme le Syndicat ou l'Agence de l'eau m'a permis de mieux cerner certains enjeux et problématiques actuelles.

Bibliographie

- Aho, K. S., Cawley, K. M., Hall, R. O., Jr., Hensley, R. T., Dodds, W. K., Harrison, N., & Goodman, K. J. (2025). Gas transfer velocity (k_{600}) increases with discharge in steep streams but not in low-slope streams. *Limnology and Oceanography Letters*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/lol2.70003>
- Appling, A. P., Hall, R. O., Jr., Yackulic, C. B., & Arroita, M. (2018). Overcoming equifinality: Leveraging long time series for stream metabolism estimation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(2), 624–645. <https://doi.org/10.1002/2017JG004140>
- Bernhardt, E. S., Heffernan, J. B., Grimm, N. B., Stanley, E. H., Harvey, J. W., Arroita, M., Appling, A. P., Cohen, M. J., McDowell, W. H., Hall, R. O., Jr., Read, J. S., Roberts, B. J., Stets, E. G., & Yackulic, C. B. (2018). The metabolic regimes of flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 63(S1), S99–S118. <https://doi.org/10.1002/lno.10726>
- Bernal, S., Cohen, M. J., Ledesma, J. L. J., Kirk, L., Martí, E., & Lupon, A. (2022). Stream metabolism sources a large fraction of carbon dioxide to the atmosphere in two hydrologically contrasting headwater streams. *Limnology and Oceanography*, 67, 2621–2634. <https://doi.org/10.1002/lno.12226>
- Botter, G., Carozzani, A., Peruzzo, P., & Durighetto, N. (2022). Steps dominate gas evasion from a mountain headwater stream. *Nature Communications*, 13, 7803. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35552-3>
- Datry, T., Snelder, T., Sauquet, E., Pella, H., Catalogne, C., & Lamouroux, N. (2012). *Hydrologie des étiages : typologie des cours d'eau temporaires et cartographie nationale* [Rapport final ONEMA–Irstea]. https://www.metis.upmc.fr/sites/default/files/media/DATRY_METIS%202020.pdf
- Datry, T., Foulquier, A., Corti, R., von Schiller, D., Tockner, K., Mendoza-Lera, C., Clément, J. C., Gessner, M. O., Moleón, M., Stubbington, R., Gücker, B., Albariño, R., Allen, D. C., Altermatt, F., Arce, M. I., Arnon, S., Banas, D., Banegas-Medina, A., ... Zoppini, A. (2018). A global analysis of terrestrial plant litter dynamics in non-perennial waterways. *Nature Geoscience*, 11, 497–503. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0134-4> (Nature)
- Guillon, S. (2021). *Approches couplées pour la caractérisation du fonctionnement biogéochimique en zone critique : de la géochimie isotopique à la modélisation* [Habilitation à diriger des recherches, Sorbonne Université]. HAL Archives ouvertes. <https://minesparis-psl.hal.science/tel-03363518>
- Hall, R. O., Jr., Tank, J. L., Baker, M. A., Rosi-Marshall, E. J., & Hotchkiss, E. R. (2016). Metabolism, gas exchange, and carbon spiraling in rivers. *Ecosystems*, 19, 73–86. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9918-1>
- López-Rojo, N., Sarremejane, R., Foulquier, A., Singer, G., Diamond, J., Rioux, D., ... Datry, T. (2025). Alternating drying and flowing phases control stream metabolism through short- and

long-term effects: Insights from a river network. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 130(3), e2024JG008369. <https://doi.org/10.1029/2024JG008369>

Odum, H. T. (1956). Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 1(2), 102–117. <https://doi.org/10.4319/lo.1956.1.2.0102>

Raymond, P. A., Zappa, C. J., Butman, D., Bott, T. L., Potter, J. D., Mulholland, P. J., Laursen, A. E., McDowell, W. H., & Newbold, D. (2012). *Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers*. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 2(1), 41–53. <https://doi.org/10.1215/21573689-1597669>

Sauquet, E., Beaufort, A., Sarremejane, R., & Thirel, G. (2021). Predicting flow intermittence in France under climate change. *Hydrological Sciences Journal*, 66(14), 2046–2059. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1963444>

Snelder, T. H., Datry, T., Lamouroux, N., Larned, S. T., Sauquet, E., Pella, H., & Catalogne, C. (2013). Regionalization of patterns of flow intermittence from gauging station records. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2685–2699. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2685-2013>

Von Schiller, D., Datry, T., Corti, R., Foulquier, A., Tockner, K., Marcé, R., García-Baquero, G., Odriozola, I., Obrador, B., Eloise, A., Mendoza-Lera, C., Gessner, M. O., Stubbington, R., Albariño, R., Allen, D. C., Altermatt, F., Arce, M. I., Arnon, S., Banas, D., ... Zoppini, A. (2019). *Sediment respiration pulses in intermittent rivers and ephemeral streams*. *Global Biogeochemical Cycles*, 33(10), 1251–1263. <https://doi.org/10.1029/2019GB006276>

Annexes:

Annexe 1 : Script R

```
#set le working directory
library(streamMetabolizer)
library(dplyr)
library(readr)
library(ggplot2)
library(lubridate)
df <- read_delim("Projet.csv", delim = ";")
df <- df %>% mutate(solar.time = as.POSIXct(solar.time, format = "%d/%m/%Y %H:%M", tz = "UTC"))
#la c'est pour remettre les jours au bon format

glimpse(df) #vérifier que c'est le bon format au niveau des données
bayes_name <- mm_name(type='bayes', pool_K600 = 'binned', err_obs_iid=TRUE, err_proc_iid=TRUE) #si on veut inclure le k600
#sinon on fait pool_K600=none
bayes_specs <- specs(bayes_name)
bayes_specs
#ici on peut modifier les paramètre de bayes_specs bayes_specs <- specs(bayes_name, ET LA LES PARAMETRES QU'ON VEUT MODIFIER)

bayes_specs <- specs(bayes_name, burnin_steps = 1000, saved_steps = 1000)
bayes_specs

mm <- metab(bayes_specs, data = df) #on lance le modèle

results <- get_params(mm) #notamment si on veut faire apparaître les K600 si on les a binned
print(results, n = Inf)

# joli graph
ggplot(graph, aes(x = date)) +
  geom_ribbon(aes(ymin = GPP.lower, ymax = GPP.upper), fill = "green", alpha = 0.2) +
  geom_line(aes(y = GPP), color = "darkgreen") +
  geom_line(aes(y = ER), color = "red") +
  theme_minimal() +
  labs(title = "GPP (vert) et ER (rouge)", y = "mg O2 / m² / jour")

plot_metab_preds(mm) # joli graph 2

#RMSE
# 1. Prédiction des concentrations d'oxygène dissous
pred_DO <- predict_DO(mm)
print(pred_DO)

# 2. Création d'une colonne "date"
pred_DO <- pred_DO %>%
  mutate(date = as_date(solar.time))

# 3. Calcul du RMSE pour chaque jour
rmse_daily <- pred_DO %>%
  group_by(date) %>%
  summarise(
    RMSE = sqrt(mean((DO.obs - DO.mod)^2, na.rm = TRUE)))

print(rmse_daily, n=Inf)
#visualiser les rmse
ggplot(rmse_daily, aes(x = date, y = RMSE)) +
  geom_line() +
  geom_point() +
  labs(title = "Daily RMSE between DO.obs and DO.mod",
    x = "Date", y = "RMSE (mg/L)") +
  theme_minimal()
#Si RMSE <0.2 good

#R2
r2_daily <- pred_DO %>%
  group_by(date) %>%
  summarise(
    R2 = 1 - sum((DO.obs - DO.mod)^2, na.rm = TRUE) /
      sum((DO.obs - mean(DO.obs, na.rm = TRUE))^2, na.rm = TRUE))
print(r2_daily, n=Inf)
#si R2 >0.75 good
```

```

#MAE
mae_daily <- pred_DO %>%
  group_by(date) %>%
  summarise(
    MAE = mean(abs(DO.obs - DO.mod), na.rm = TRUE))
print(mae_daily, n=Inf)
#Si MAE <0.2 good

plot_DO_preds(mm) # faire apparaître oxygène prédit et observé
mcmc <- get_mcmc(mm)
rstan::traceplot(mcmc, pars='K600_daily', nrow=3)

ggplot(df, aes(x = solar.time)) +
  geom_line(aes(y = DO.obs), color = "blue") +
  geom_line(aes(y = light / max(light) * max(DO.obs)), color = "yellow") +
  facet_wrap(~ format(solar.time, "%Y-%m-%d"), scales = "free_x", ncol = 4) +
  theme_minimal() +
  labs(title = "DO.obs vs Light") #si on veut comparer la réponse en oxygène en fonction de la lumière disponible par jour

#Résultats de convergence
mcmc <- get_mcmc(mm)

get_fit(mm)$overall %>%
  select(ends_with('Rhat'))
get_fit(mm) %>%
  lapply(names)
fit <- get_fit(mm)

GPP_Rhat <- fit$daily %>%
  as.data.frame() %>%
  select(GPP_Rhat)
print(GPP_Rhat)

ER_Rhat <- fit$daily %>%
  as.data.frame() %>%
  select(ER_Rhat)
print(ER_Rhat)

K600_Rhat <- "K600_daily_Rhat"
K600_Rhat <- fit$daily %>%
  as.data.frame() %>%
  select(all_of(K600_Rhat))
print(K600_Rhat)

# Enregistrement dans un fichier CSV
write.csv(results, file = "resultats_Cochelin.csv", row.names = FALSE)
write.csv(GPP_Rhat, file = "GPP_Rhat_Cochelin.csv", row.names = FALSE)
write.csv(ER_Rhat, file = "ER_Rhat_Cochelin.csv", row.names = FALSE)
write.csv(K600_Rhat, file = "K600_Rhat_Cochelin.csv", row.names = FALSE)
write.csv(pred_DO, file = "Pred_DO_Cochelin.csv", row.names = FALSE)
write.csv(rmse_daily, file = "RMSE_Cochelin.csv", row.names = FALSE)
write.csv(r2_daily, file = "R2_Cochelin.csv", row.names = FALSE)
write.csv(mae_daily, file = "MAE_Cochelin.csv", row.names = FALSE)

```



Léo Boullé
2024-2025

Estimation du métabolisme aquatique des cours d'eau intermittents

Résumé : Le métabolisme des cours d'eau reflète l'équilibre entre la production primaire brute et la respiration écosystémique. Il constitue un indicateur clé du fonctionnement des écosystèmes, permettant de mieux comprendre la dynamique des nutriments et de la matière organique dans les écosystèmes d'eau douce. Comprendre ces processus est particulièrement important dans le contexte du changement climatique, avec l'augmentation de la durée et de la fréquence des sécheresses hydrologiques. L'étude se concentre sur trois petits bassins versants en Bretagne (Ouest de la France) exposés à des degrés variés d'intermittence hydrologique. Nous cherchons à comprendre l'effet de cette intermittence sur le métabolisme des cours d'eau. Nous avons émis l'hypothèse qu'un « pulse » de respiration écosystémique (RE) survient après la reconnexion des tronçons, et que le degré d'intermittence influence cette réponse métabolique. Nous avons appliqué le package StreamMetabolizeR pour estimer le métabolisme quotidien des trois bassins avant et après les périodes d'assèchement.

INRAE Rennes
65 rue de Saint-
Brieuc,
35000, Rennes

Tuteur entreprise :
Dupas Rémi et
Fovet Ophélie

Tuteur académique :
Stéphane Rodriguez