



HAL
open science

PROJET MARS-TNT: Modélisation du développement des algues vertes en Baie de St Brieuc au moyen du modèle littoral MARS3D-Ulves couplé au modèle agro-hydrologique TNT2

Francois Oehler, Patrick Durand

► To cite this version:

Francois Oehler, Patrick Durand. PROJET MARS-TNT: Modélisation du développement des algues vertes en Baie de St Brieuc au moyen du modèle littoral MARS3D-Ulves couplé au modèle agro-hydrologique TNT2. [Rapport de recherche] INRAE. 2021, 44 p. hal-03345510

HAL Id: hal-03345510

<https://hal.inrae.fr/hal-03345510>

Submitted on 15 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



PROGRAMME 162 : DES INTERVENTIONS TERRITORIALES DE L'ETAT

ACTION 02 « EAU ET AGRICULTURE EN BRETAGNE »

Modélisation du développement des algues vertes en Baie de Saint-Brieuc au moyen du modèle littoral MARS3D-Ulves couplé au modèle agro-hydrologique TNT2

Table des matières

Rappel du contexte et des objectifs	4
Actualisation des données de simulations TNT2 sur les bassins versants de la Baie de St Brieuc	5
Le modèle TNT2.....	5
Extension du périmètre simulé	6
Données climatiques	7
Données sols et géomorphologie.....	8
Figure xx : carte des UCS Sols de Bretagne et contours des bassins-versants.	8
Données de dépôts d'azote atmosphérique	8
Données occupation du sol et agronomie	8
Méthode de calibration du modèle	9
Résultats des calibrations.....	11
Contexte	11
Les limites de l'exercice.....	11
Les résultats.....	12
Anse d'Yffiniac	12
Gouessant.....	15
Gouet.....	20
Performance du modèle : à nuancer par la qualité de la mesure.....	25
Scénarios d'abattement des flux d'azote à l'exutoire des 3 bassins versants	26
Le scénario sc30.....	26
Scenarios climatiques	30
La méthode de correction quantile-quantile	30
Les scénarios RCP	31
La zone d'étude	32
Les données disponibles.....	32
Comparaison des 30 dernières années climatiques avec les projections 2030-2060 (Futur Proche) et 2060-2090 (Futur Lointain).....	33
Résultats des simulations TNT2.....	37
Couplage Ecomars-Ulves et TNT2 : synthèse des résultats.....	41
Remarque préliminaire.....	41
Rappel des résultats majeurs	41
Quel écart entre modèle et réalité observée?	43
Synergies et antagonismes entre processus terrestres et côtiers	43
Références Bibliographiques	45

Table des illustrations et tableaux

Figure 1 : principe de fonctionnement de TNT2	6
Figure 2 : extension des périmètres simulés par TNT2. En hachuré, les surfaces supplémentaires modélisées dans cette étude	6
Figure 3 : zonage météorologique.....	7
Figure 4 : carte des UCS Sols de Bretagne et contours des bassins-versants.....	8
Figure. 6 : Anse d'Yffiniac, calibration/validation, 2008-2017.....	13
Figure 7: Anse d'Yffiniac. Focus sur 2010 (Mars - Septembre).....	14
Figure 8: Gouessant, calibration / validation, 2008-2017	16
Figure 9: Gouessant, focus sur 2011 (Mars-Septembre)	16
Figure 10: Gouessant, calibration / validation, 2008-2017.....	18
Figure11: Gouessant, focus 2011 (Mars - Septembre)	19
Figure 12: Gouet, calibration / validation, 2008-2017	21
Figure 13: Gouet, Focus sur 2011 (Mars-Septembre).....	22
Figure 14: Gouet, calibration/validation, 2008-2017.....	23
Figure 15: Gouet, focus sur 2011 (Mars - Septembre).....	24
Figure 16: Exutoire du Gouessant, concentrations moyennes hebdomadaires :mesures, interpolations et modèle TNT2	25
Tableau 1: Proportion effective de surfaces en prairies créées par un seuil de 10 % ZH (scénario sc30) et 20 % ZH. Moyennes sur la simulation	27
Tableau 2: Flux moyen en 2036 (10 dernières années), corrigés par l'hydraulicité, des scénarios sc0 et sc30	28
Figure 17 : flux nitriques cumulés aux exutoires des trois bassins versants selon les deux scénarios.	29
Figure 18: Q90 mensuel des concentrations, Anse d'Yffiniac.	29
Figure 18: Q90 mensuel des concentrations, Gouet.	29
Figure 19: Q90 mensuel des concentrations, Gouessant.....	30
Tableau 4 : Principales projections climatiques disponibles pour la région.....	30
Tableau 5 : caractéristiques des scénarios RCP.....	31
Figure 20 : évolution du forçage climatiques des scénarios du RCP et SRES	31
Figure 21 : maillage SAFRAN et point de référence choisi.....	32
Tableau 5 : maillage SAFRAN et point de référence choisi	32
Figure 22 : Evolution des précipitations annuelles à deux horizons temporels dans les différents scénarios RCP.....	33
Figure 23 : Evolution des précipitations estivales à deux horizons temporels dans les différents scénarios RCP.....	34
Figure 24 : moyennes des précipitations mensuelles dans les différents scénarios RCP.....	35
Figure 25 : évolution du rayonnement global à deux horizons temporels pour les scénarios RCP.	35
Figure 26 : évolution du rayonnement global à deux horizons temporels pour les scénarios RCP.	36
Figure 27 : comparaison des flux d'azote annuels et estivaux sur les trois bassins versant. Le scenario « Sc0 actuel+ module CO2 » mesure l'impact de l'activation du module de prise en compte de l'effet de la concentration en CO2. Les nombres dans la partie haute du graphique correspondent aux p values du test de Wilcoxon : un nombre>0.05 indique une différence non significative entre les populations. Les nombres inférieurs sont les médianes.....	37
Figure 28 : comparaison des flux d'azote estivaux sur les trois bassins versant. Les nombres dans la partie haute du graphique correspondent aux p values du test de Wilcoxon : un nombre>0.05 indique une différence non significative entre les populations. Les nombres inférieurs sont les médianes.....	38
Figure 29 : flux nitriques cumulés pour les scénarios climatiques	39
Figure 30 : Q90 des concentrations pour les scénarios climatiques	40
Figure 31. Relation entre flux d'azote mai-sept arrivant à la baie et surface couverte en aout-septembre : données mesurées (haut) et simulées (bas).....	41
Figure 32 : relation entre l'abattement de flux estival et de biomasse algale : (sc30-sc0)/sc0	42
Figure 33 : relation entre l'abattement le flux estival sc0 et l'abattement de biomasse algale : (sc30-sc0)/sc0.....	42
Figure 33 : relation entre flux d'azote estivaux (mai-septembre) et cumuls de pluie hivernaux et estivaux.....	44
Figure 34 : relation entre l'abattement relatif (flux sc0-flux sc30)/flux sc0 et la lame d'eau annuelle	44

Rappel du contexte et des objectifs

Le budget opérationnel du programme PITE action n°2 « Eau Agriculture en Bretagne », du programme 162, programme des interventions territoriales de l'État, rassemble les moyens budgétaires de différentes origines ministérielles en vue de poursuivre, dans la durée, une action de reconquête de la qualité de l'eau et de lutte contre les algues vertes en Bretagne.

Cette action, pilotée par les services de l'État en région Bretagne, mobilise les collectivités (Conseil régional, conseils généraux, communautés de communes) et de nombreux acteurs publics (Agence de l'eau Loire-Bretagne, ADEME, ARS, Chambre régionale d'agriculture...) sur des objectifs communs et des mesures concrètes.

Un premier Plan de lutte contre la prolifération des algues vertes (PLAV) 2010-2015 est prolongé par un second plan (PLAV2) 2017-2021. Trois volets constituent ce plan : un volet préventif, un volet curatif et enfin un volet « amélioration des connaissances et appui scientifique au plan ».

Le présent projet vise à **améliorer la chaîne de modélisation permettant de relier les pratiques agricoles existantes ou futures dans les bassins versants alimentant les baies à algues vertes et l'importance de la prolifération algale dans ces baies**. Il est présenté en complément du projet déposé par le CEVA (Centre de valorisation des Algues) pour répondre à la même problématique, les deux projets étant complémentaires et dépendants l'un de l'autre.

Jusqu'à présent, les huit baies à algues vertes incluses dans le PLAV ont fait l'objet de deux types de modélisation :

- ✓ des modélisations agro-hydrologiques avec les modèles TNT2 ou CASIMOD'N, visant à simuler le lien entre activités agricoles et flux nitriques aux exutoires des bassins versants alimentant les baies. Ces modèles ont permis de simuler la période 2000-2010 et de proposer, selon divers scénarios, des prédictions sur la période 2011-2027.
- ✓ des modélisations bio-physico-chimiques au moyen du modèle Mars-Ulves. Ce modèle permet, pour un site donné, de simuler la croissance et la production en algues vertes sur une année de référence et d'opérer, aux exutoires alimentant les baies, des scénarios de réduction des flux de nutriments.

A ce stade, le constat partagé par les scientifiques, la coordination du PLAV et une majorité de gestionnaires des baies concernées est que ce travail présenterait un intérêt à être poursuivi et compléter dans les directions suivantes :

- ✓ Modèles TNT2: actualisation des données, simulation de l'intégralité des surfaces alimentant les baies (les simulations ayant été faites sur les bassins principaux, parfois à des points exutoires situés assez en amont des embouchures).
- ✓ Modèle Mars-Ulves : harmonisation des simulations avec la dernière version du modèle, simulation de plusieurs années contrastées, estimation des reports de stocks hivernaux, passage des biomasses produites (sorties actuelles du modèle) à une estimation des surfaces couvertes (critère DCE).
- ✓ « Couplage » des deux modèles pour permettre au modèle Mars-Ulves de disposer pour les scénarii agricoles testés de chroniques de concentration plus réalistes. Actuellement, la situation de référence est basée sur des débits extrapolés aux exutoires et les concentrations sont issues de simples interpolations linéaires. De plus, les scénarii d'abattement sont établis sur la base des débits de référence et de concentrations limitées à X mg/l de façon uniforme sur l'année alors qu'il semble que les concentrations printanières/estivales peuvent fortement varier, en fonction de la nature des BV et des pratiques agricoles, dans le cas des différents scénarii agricoles. Ce couplage permettra aussi d'analyser les synergies et antagonismes des effets climatiques sur les flux nitriques et sur la croissance des algues (exemple : un printemps froid et humide limite la croissance des algues sur le moment, mais favorise le maintien de flux nitriques élevés plus tard dans la saison, qui vont favoriser les blooms en début d'été...), et d'améliorer la prédiction des probabilités de retour à un bon état écologique des masses d'eau.

Il est clair que réaliser l'ensemble de ces travaux sur l'ensemble des baies n'est pas envisageable à court terme compte tenu des moyens mobilisables par les différentes équipes de recherches. Il est d'autre part souhaitable, notamment pour la partie « couplage » de modèles, d'en tester la faisabilité et l'intérêt sur un site donné.

En conséquence, il a été proposé d'effectuer un premier travail se focalisant sur les blooms algaux en baie de Saint-Brieuc. Ce choix se justifie ainsi :

- ✓ Disponibilité de données en nombre, durée et qualité, tant au niveau continental que côtier permettant d'envisager une calibration et une validation satisfaisante des deux modèles. Concernant le modèle MARS3D-Ulves, des données pluriannuelles d'observations sont disponibles sur cette baie (évolution mensuelle des surfaces d'échouages/quotas en azote et phosphore),
- ✓ Succès de la réalisation d'une simulation Mars-Ulves détaillée de la baie sur l'année 2009. Les données de terrain disponibles en nombre sur cette baie permettront de caler et de valider le modèle.
- ✓ Réponse significative de cette baie depuis 2010 aux années de flux bas : surfaces en ulves nettement abattues certaines années avec apparition en fin de saison, selon les années, d'un bloom en *Pylaiella* (algue brune filamenteuse),
- ✓ Importance d'un gradient climatique et hydrologique d'Ouest en Est, maximisant les interactions possibles entre climat-flux nitriques-croissances algales,
- ✓ Fort intérêt des gestionnaires locaux pour la compréhension de l'eutrophisation de la baie et la projection des actions engagées à diverses échéances sur le milieu, y compris au travers des approches de modélisation.

En étroite collaboration avec l'entreprise SCHEME, l'UMR SAS s'est proposée à réaliser les tâches suivantes

- ✓ Actualiser les simulations de TNT2 sur les trois bassins-versants concernés
- ✓ Réaliser une série de scénarios permettant de répondre aux questions posées, et notamment en incluant des scénarios de diminution de flux nitriques et des projections climatiques futures.
- ✓ Réaliser des simulations couplées entre TNT2 et Ecomars-Ulves afin de mieux simuler les phénomènes actuels et déterminer les probabilités d'apparition de situations limitantes en azote en fonction des années climatiques et du niveau moyen de concentration/flux nitrique.
- ✓ Assister le CEVA dans la recherche de formalisme de modélisation des reconductions hivernales de stocks d'algues
- ✓ Interpréter les résultats, animer et coordonner le projet conjoint avec le CEVA.

Actualisation des données de simulations TNT2 sur les bassins versants de la Baie de St Brieuc

Le modèle TNT2

Le modèle TNT2 (Topography-based Nitrogen Transfert and Transformations) est un modèle agro-hydrologique distribué maillé, basé sur le couplage d'un modèle hydrologique inspiré de TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979) et du modèle agronomique STICS de l'INRA (Brisson et al., 1998).

Il décrit, au pas de temps journalier et à l'échelle de la maille (i) l'organisation latérale et verticale des écoulements de l'eau dans le bassin versant, (ii) la croissance des plantes en fonction des conditions pédoclimatiques, (iii) les transferts et les biotransformations de l'azote dans le sol et le sous-sol.

Les originalités de ce modèle résident principalement

- ✓ Dans sa capacité à prendre en compte une description fine des pratiques agricoles à l'échelle parcellaire, et donc de simuler des scénarios détaillés d'évolution de ces pratiques, que ce soit dans leur répartitions spatio-temporelle, dans la modification des itinéraires techniques, dans la mise en place de structures paysagères (zones humides, haies), dans les changements d'usage des sols.
- ✓ Dans sa capacité à prendre en compte les interactions sol-nappe de subsurface et leurs conséquences sur les transferts et transformations d'azote, ce qui le rend particulièrement bien adapté au contexte des bassins tempérés sur socle ancien.
- ✓ Dans sa capacité de simuler les stockages et remobilisation de l'azote dans les sols, la biomasse et les nappes, ce qui le rend capable de simuler des périodes de plusieurs dizaines d'années en continu.

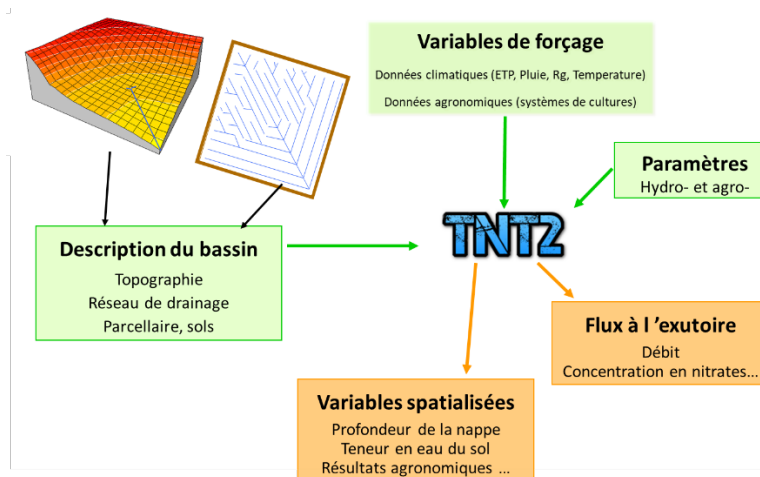


Figure 1 : principe de fonctionnement de TNT2

Extension du périmètre simulé

Afin de fournir les flux arrivant en baie, il est nécessaire de simuler l'intégralité de la surface contributrice. Etant donné que le système Ic est assez déconnecté du reste de la baie, on a choisi de se focaliser sur le fond de baie, et donc sur les trois bassins versant du Gouet, de l'Anse d'Yffiniac et du Gouessant. Dans la précédente étude de modélisation de ces bassins, le choix avait été fait de simuler les bassins versants jusqu'à la station qualité choisie pour la complétude de sa chronique. Il a donc fallu étendre les périmètres simulés. Ces premières simulations représentaient respectivement 74%, 37% et 57% de la surface totale des bassins du Gouet, de l'Anse d'Yffiniac et du Gouessant (Figure 2). Si pour le premier le complément, majoritairement en zone urbaine, inclut une surface assez faible de sols agricoles supplémentaires, ce n'est pas le cas des deux autres.

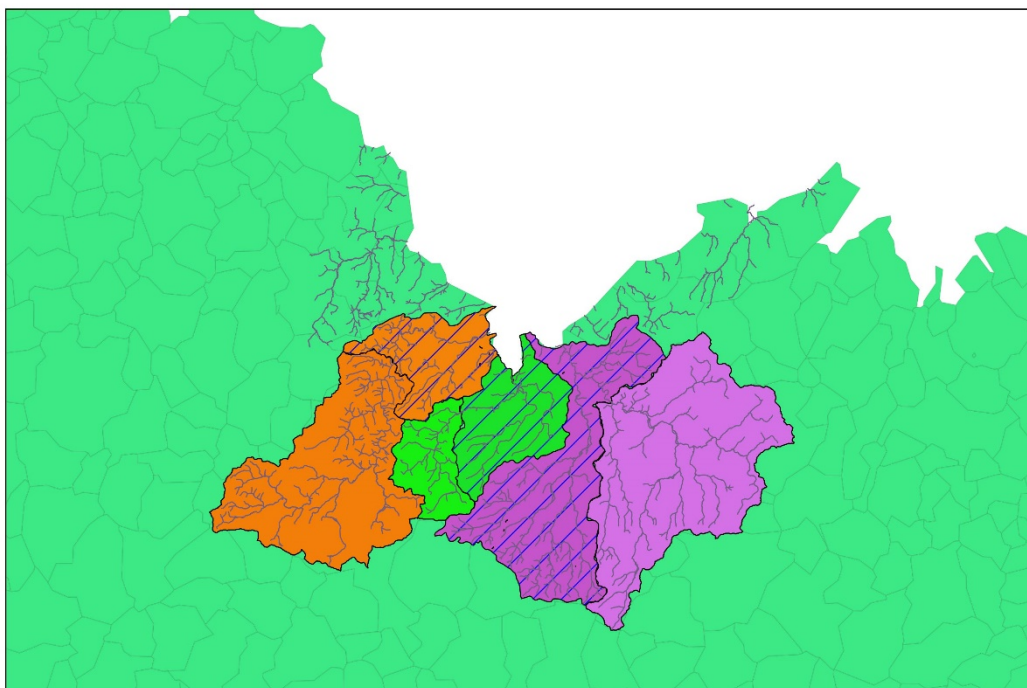


Figure 2 : extension des périmètres simulés par TNT2. En hachuré, les surfaces supplémentaires modélisées dans cette étude

Données climatiques

Les données météorologiques : les valeurs de précipitation liquide ($PRELIQ_Q$), d'évapotranspiration (ETP_Q), de température minimale ($TINF_H_Q$), de température maximale ($TSUP_H_Q$), et de rayonnement visible (DLI_Q), proviennent de Météo France, dans la base appelée SAFRAN. Du 1er janvier 2000 au 30 septembre 2016 : on dispose des données représenté sous forme des cartes rasters : une carte par jour et par variable météo, maillée (maille de 8000m) sur toute la France.

Du 1er octobre 2016 au 31 décembre 2018 : on dispose d'un fichier par maille, sur 18 mailles de la zone d'études. Et pour les mailles manquantes, nous avons utilisé les mailles adjacentes pour les calculer. Ces données sont fournies gratuitement par Météo France à INRAE dans le cadre d'une convention bilatérale. Ces données spatialisées permettent de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des conditions météorologiques, et ce à travers la détermination de zones météo utilisées par le modèle TNT2.

La 1ère étape du traitement des données consiste à numériser les carte rasters de la période allant du 1er janvier 2000 jusqu'à 30 septembre 2016.

Ensuite et puisque chaque maille de la carte météo représente une information différente, nous avons choisi de faire un zonage par maille de 8000m et associer à chacune de ces zones donc un fichier d'entrée du modèle qui contient toutes les variables de la simulation sur la période allant de 01/01/2000 jusqu'à 31/12/2018.

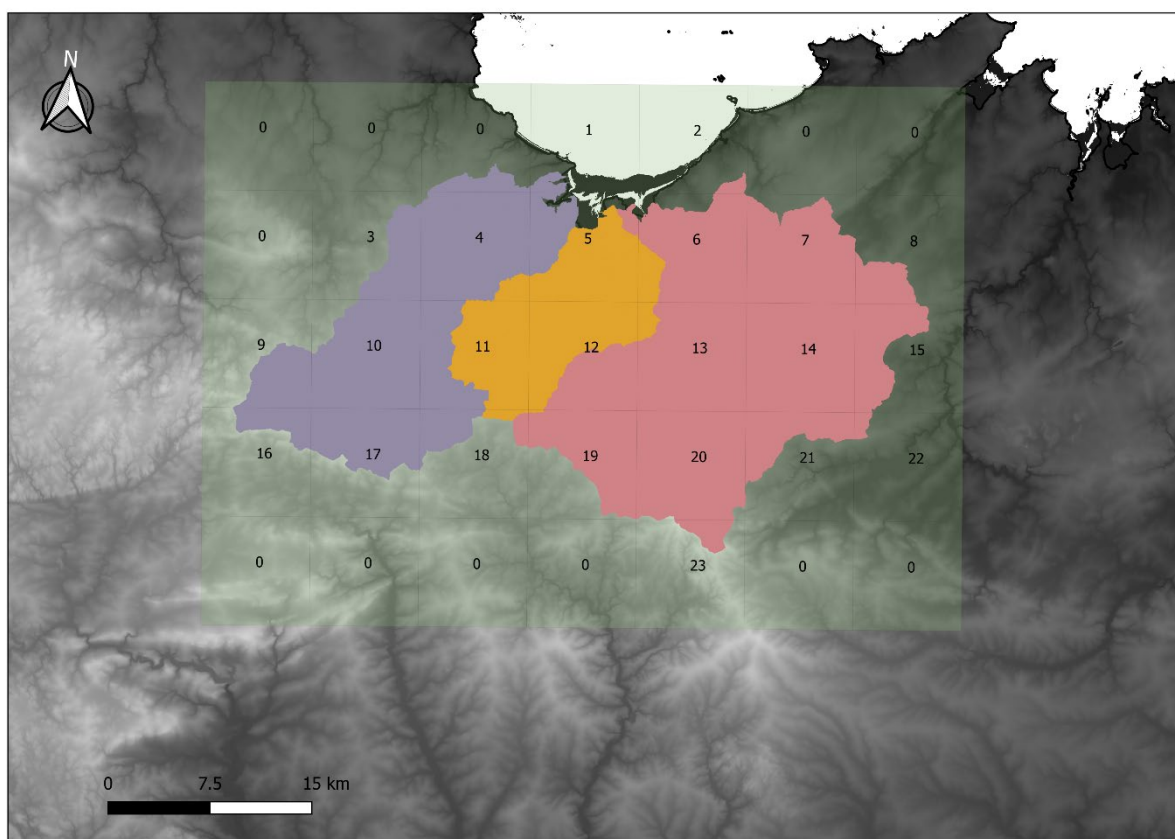


Figure 3 : zonage météorologique

La résolution d'entrée du modèle MARSTNT2 est fixé à 25m. cela signifie que tout raster utilisé en entrée de modèle doit correspondre à cette résolution. Pour ce faire, et après la définition des zones météo et les fichiers associés à ces zones, nous avons

fait un maillage de 25m tout en s'appuyant sur le maillage de base de 8000m, en faisant une jointure spatiale (par localisation) pour croiser les numéros des zones météo de la grille de 8000m qui fait référence aux données chronique météo à la grille de 25m.

Données sols et géomorphologie

Le relief des bassins versants, nécessaire aux calculs hydrologiques de TNT2, a été tiré du MNT au pas de 25m de l'IGN, de type RGE ALTI et retravaillé sous ArcGis pour générer des arbres de drainage cohérents/

Les types de sols ont été déduits des UCS Sol de Bretagne (fig xx)

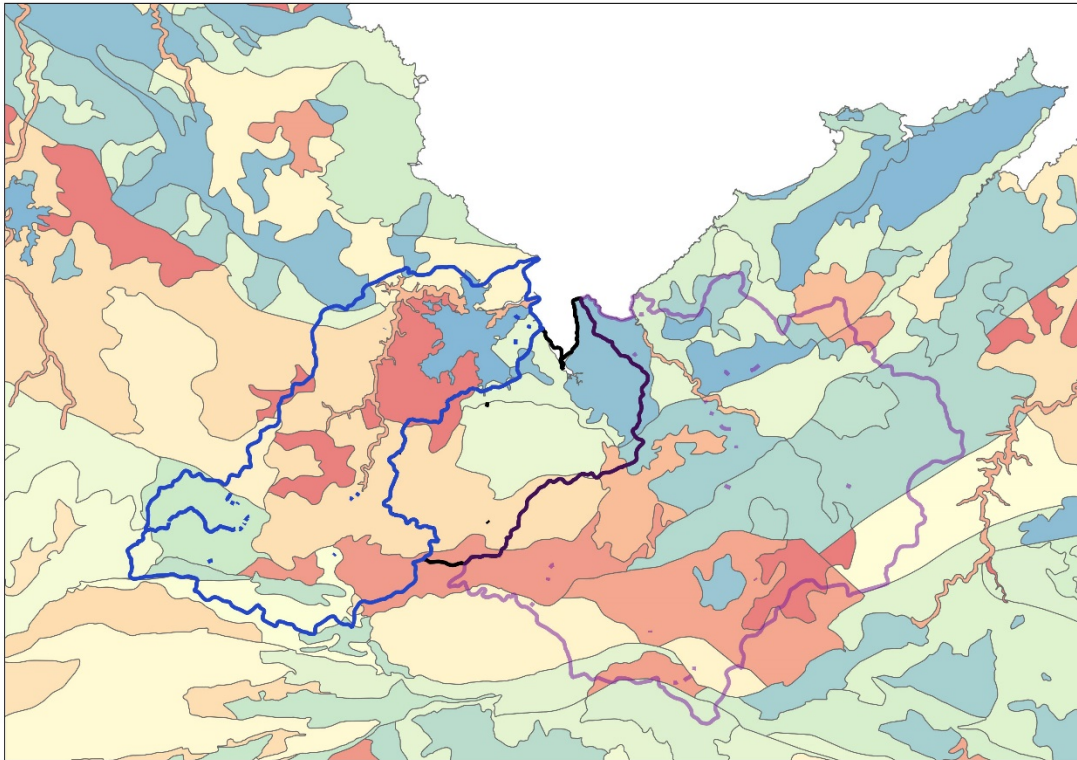


Figure 4 : carte des UCS Sols de Bretagne et contours des bassins-versants.

Données de dépôts d'azote atmosphérique

Ces données sont issues de l'EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) qui suit à long terme la pollution atmosphérique par l'utilisation d'un modèle émissions-dépôts à grande échelle calé sur un réseau de stations en zones rurales. Les résultats sont disponibles selon un maillage au pas de 50 m au pas de temps annuel, en séparant dépôts secs et dépôts humides. Les dépôts secs introduits au pas de temps journalier dans le modèle (valeur constante sur l'année), et les dépôts humides sont divisés par la pluviosité annuelle pour calculer une concentration moyenne en N de la pluie, et sont donc variables selon la pluviosité journalière. Les dépôts atmosphériques totaux sont estimés à environ 6kg/ha/an en moyenne sur la zone

Données occupation du sol et agronomie

Le modèle demande en entrée la description des pratiques agricoles sur toutes les parcelles et toutes les années. Comme cette donnée n'est ni connue, ni renseignable avec ce degré de détail, nous avons recours à un modèle d'affectation automatique de différents itinéraires techniques (ITK) et différentes rotations sur l'ensemble du parcellaire des Baies, en respectant un certain nombre de contraintes, et notamment la quantité totale d'apports minéraux et organiques (en distinguant bovin, porcin et volailles) par sous bassin versant.

Le parcellaire, la localisation et les successions des cultures ont été déterminés à l'échelle de l'îlot PAC en partant de la série de RPG de 2006 à 2015 traitée par l'ODR (observatoire du développement rural, INRAE), complétée par la base de donnée d'occupation du

sol (OCS) établie par le SAGE de la Baie. Ces données sont toutefois incomplètes : culture principale seulement, manquante certaines années pour certaines parcelles. L'occupation du sol hivernale est complétée grâce à des règles de décisions basées sur le précédent et le suivant cultural, et variables selon les périodes considérées (évolution de la réglementation). Les cultures manquantes sont complétées soit en fonction de la rotation observée sur les années précédentes ou suivantes (si moins de 5 données manquantes) soit sur la base de la répartition des cultures dans le sous-bassin considéré. De l'ensemble des rotations observées sont calculées des matrices de probabilités de suivant ou de précédant d'une culture donnée dans un sous-bassin donné. De là on génère l'ensemble des occupations du sol estivales et hivernales sur toute la période de simulation et les années futures du scénario « sc0 » (voir plus loin). Les scénarios alternatifs sont obtenus en changeant les probabilités des suivants sur les parcelles ciblées (probabilité=1 pour la prairie, 0 pour toutes les autres cultures).

Pour les itinéraires techniques les plus classiquement appliqués sur les différentes cultures, nous sommes repartis de la base utilisée dans le travail précédent, établie avec l'aide de la chambre d'agriculture. Nous avons de plus eu la confirmation que les itks n'avaient pas changer sensiblement depuis 2010, donc que nous étions fondés à les réutiliser sur la période. Dans ces ITKs, les doses et types d'apports d'azote sont variables. Leur proportion est déterminée de façon à ce que les doses totales appliquées par sous bassin correspondent aux pressions fournies par le SAGE sur la base des déclarations de flux d'azote (DFA). La proportion entre les types (bovin/porcin/volailler) a été déterminée grâce aux données communales sur les élevages de la base Agreste 2010. Ces données Agreste ont permis aussi de déterminer la proportion maïs grain/maïs ensilage, non renseignée dans le RPG.

Trois périodes ont été distinguées, différant par les pressions azotées et les règles d'allocation des couverts hivernaux : 1997-2004 / 2005-2010 / 2010-2019.

Méthode de calibration du modèle

Les paramètres utilisés pour la calibration sont inspirés des précédentes études. Leur nombre est limité et adapté à la puissance de calcul. Ils ont été déterminés par une analyse de sensibilité globale selon la méthode Morris (Morris 1991).

Ces paramètres sont:

- Par type de sol

Les paramètres hydrologiques « **t** » et « **m** » qui correspondent respectivement à la transmissivité latérale à saturation et au facteur de diminution de la transmissivité avec la profondeur.

La profondeur de sol (prof_sol).

La teneur initiale en azote organique de l'humus (Norg).

- Paramètres généraux

Le facteur de la constante de vitesse potentielle de minéralisation (FMIN1).

La concentration initiale de la nappe(ini_nappe).

La fraction d'azote dénitrifiée dans le réseau hydrographique (k) avec le module rivière.

La durée de calibration est déterminée par la méthode d'identification d'événements critiques (Singh et Bárdossy 2012) . Le seuil de 90% des situations critiques sur les débits a été retenu pour calculer la durée minimale de simulation, par bassin versant.

Les chroniques de données utilisées pour la calibration ne sont pas réutilisées pour la validation. La validation se fait sur le reste du jeu de données.

La calibration est effectuée grâce à des outils de « machine learning » en particulier l'utilisation d'un algorithme génétique (Mullen *et al.* 2009). Le principe est de faire varier de manière aléatoire les paramètres de calibration sur un grand nombre de simulation. À chaque pas de temps le résultat de chaque simulation est évalué grâce à une fonction objective. Une part des simulations du pas de temps suivant est fonction des jeux de paramètres ayant reçu les meilleures notes.

Afin de réduire les temps de calcul, les performances du modèle sont évalués uniquement sur les chroniques de débits (Q), de concentration ([N]) et de flux (QN) d'azote à l'exutoire.

La fonction objective est basée sur :

-L'indice de Nash-Sutcliffe (NS, Nash et Sutcliffe (1970)) qui évalue la performance sur la dynamique et la quantité des flux.

-Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson élevé au carré (R^2) qui évalue la qualité de représentation de la dynamique et de la tendance. Par interprétation commune, le R^2 indique la variance expliquée par le modèle, en pourcentage.

L'équation de la fonction objective utilisée pour la calibration est :

$$F_{obj} = 0.65 * NS(Q) + 0.05 * dcum(Q) + 0.1 * dcum(QN) + 0.18 * R2([N]) + 0.02NS([N])$$

avec « dcum » la différence des flux cumulés.

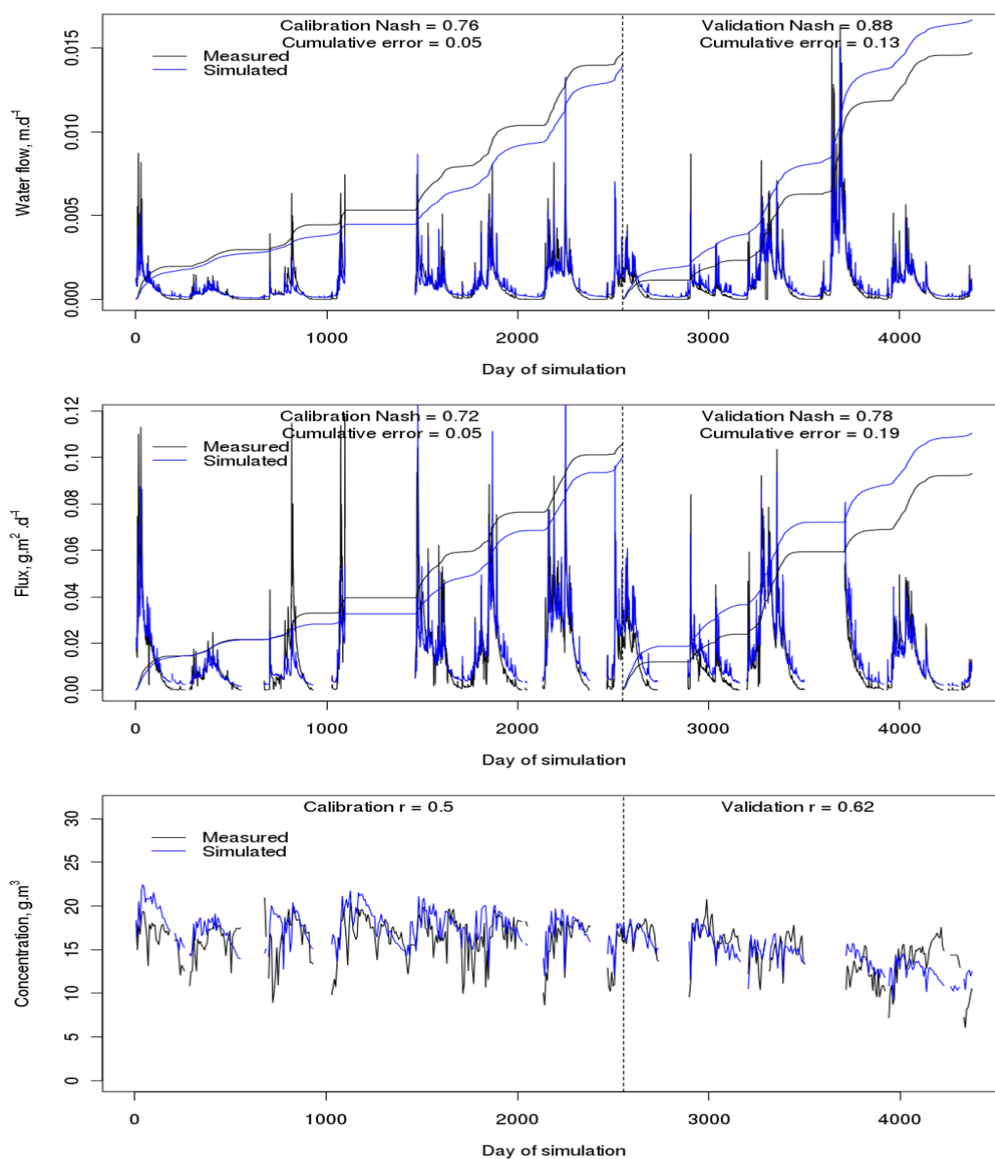


Figure 5 : Exemple de calibration (gauche) et validation (droite) sur les chroniques de débit(haut), de flux d'azote (centre) et de concentration d'azote (bas) à l'exutoire de Kervidy-Naizin entre les années 2003 et 2016.

Résultats des calibrations

Contexte

Comme historique rappelons que l'ensemble de la calibration / validation a été réalisée trois fois:

- la première calibration / validation (sur la période 2000-2017) s'était faite sur des données non validées de mesure de débits et concentrations
- la deuxième calibration / validation, bien que correcte d'un point de vue général (statistiques quantitatives), pouvait dans certain cas mal (re)présenter les événements d'étiages et leur interprétation pouvait porter à confusion (haut degrés d'incertitude relative (mais pas absolu) sur les petits flux).

Ces premières calibrations mettaient l'accent sur la généralité de la représentation des flux et dynamiques saisonnières, en maximisant l'espace de validation (la période de validation la plus grande possible) afin de présenter au mieux les incertitudes liées à l'exercice, et la propagation des erreurs / stabilité du modèle (en vue d'un usage en mode scénario, sur de longues chroniques)).

Néanmoins, afin de satisfaire aux besoins de représentation d'années iconiques, notamment les très petits flux de la saison 2011 (période sèche exceptionnelle), il a été décidé de réaliser de nouvelles calibrations sur de nouvelles bases et nouvelles contraintes :

- la période de calibration a été décalée aux périodes d'intérêts majeurs (2008-2015), avec une validation sur 2016-2017.
- il faut que le modèle représente (en calibration) au mieux les petits flux sur la période avril-septembre, et surtout l'année 2011, au moins en flux d'azote
- il faut limiter au mieux le décalage de l'erreur des petits débits/flux vers les grands débits/flux

Les limites de l'exercice

Passé un certain point, une calibration n'améliorera plus les mesures objectives de la représentativité (l'erreur de modélisation), mais pourra modifier la distribution de cette erreur (e.g. déplacer l'erreur des petits débits vers les grands). Aussi, il faut éviter la « sur-calibration », c'est-à-dire faire tout pour représenter parfaitement un événement en particulier (e.g. ici 2011), au risque de dégrader grandement les autres années.

On jouera donc sur un compromis « cas particulier » / « cas général », et déplaçant l'équilibre précédent vers les cas particuliers.

Concernant la représentation des périodes d'étiage en année (très sèche (petits débits et petits flux), notons que nous sommes dans des cas « extrêmes » en termes de modélisation (et à l'inverse, c'est le cas pour les crues e.g. décennales). Ces cas limites présentent deux obstacles : il y a peu d'occurrences / exemples pour la calibration et validation, et ils sont souvent en limite du domaine de validation du modèle, tant d'un point de vue hypothèses que structure. Immanquablement, l'erreur (qu'il est difficile d'évaluer en cas points) a tendance à exploser autour de ces situations. Une des solutions est de simplifier (intégrer) le modèle sur une de ses dimensions : ici le temps (e.g. on prend des flux cumulés).

Disons-le tout de suite, TNT2 a été pensé pour représenter de façon quantitative des flux (eau, azote) annuels / saisonniers avec des objectifs différents de ceux nécessaires à une représentation détaillée de la période d'étiage, qui concentre toutes les difficultés:

- la moindre erreur sur les entrées du système se voit beaucoup
- l'hétérogénéité du milieu se fait beaucoup plus sentir (aquifères avec des temps de résidence différents, substrat géologique, failles, inversion des dynamiques (e.g. milieux urbain à réponse rapide devient prépondérant) etc...)
- la mesure (donc la référence pour évaluer l'erreur de modélisation) est très délicate car pas prévue pour ces cas extrêmes (cours d'eau non jaugé, influence du fond plus importante, sensibilité des instruments, etc...)

Remarquons que, pour donner une échelle des incertitudes en jeu, les débits d'étiages les plus bas de 2011 (non pas mesurés directement mais interprétés) sont de l'ordre (en lame d'eau) de 1 à 10. 10^{-5} m/jour. Il suffit de quelques mm d'erreur sur les

précipitations ou ETP pour expliquer des variations de débits à l'exutoire simulé de cet ordre de grandeur, qui, en absolu, ne sont pas très importantes, mais en relatif peuvent sembler extrêmes (un différentiel d'un facteur 2).

Les résultats

Sont représentés les indices de Nash (période de validation et de calibration), les différences sur les cumuls pour chaque période (e.g. 0,1 veut dire 10 % de différence) et les coefficients de corrélation pour les concentrations en azote (moyenne mobile hebdomadaire).

La base verticale signifie la séparation entre période de calibration et période de validation.

Notons que les courbes de cumuls n'ont pas d'échelle (on ne peut comparer directement la période de calibration et validation) et sont présentées pour détecter des variations saisonnières anormales.

Anse d'Yffiniac

Ce bassin versant a été le plus simple à calibrer. Le compromis choisi à déporter un peu l'erreur sur les débits de crue. Comme décrit précédemment, le choix s'est porté sur la calibration ayant une incidence minimale sur les flux d'azote.

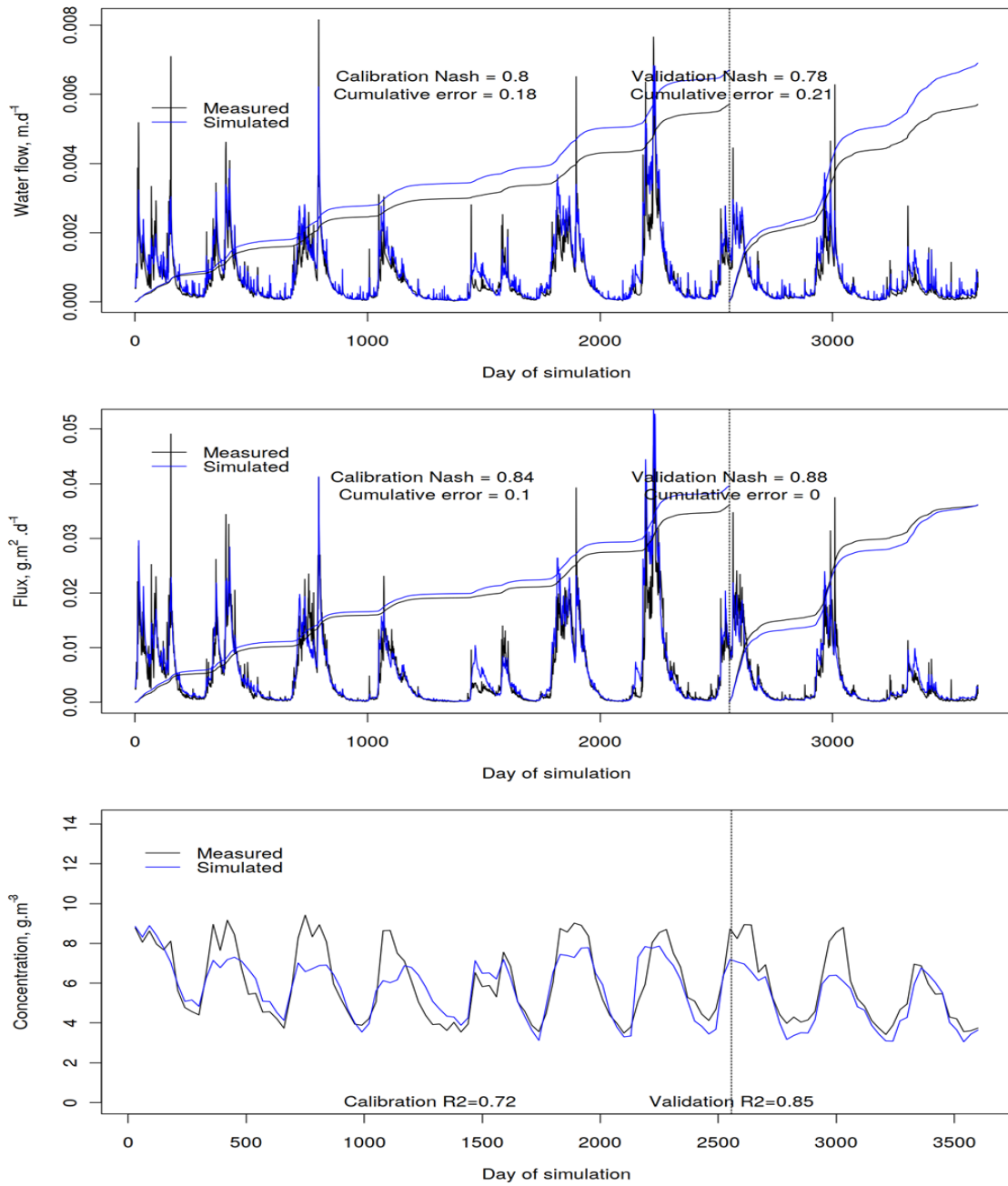


Figure. 6 : Anse d'Yffiniac, calibration/validation, 2008-2017

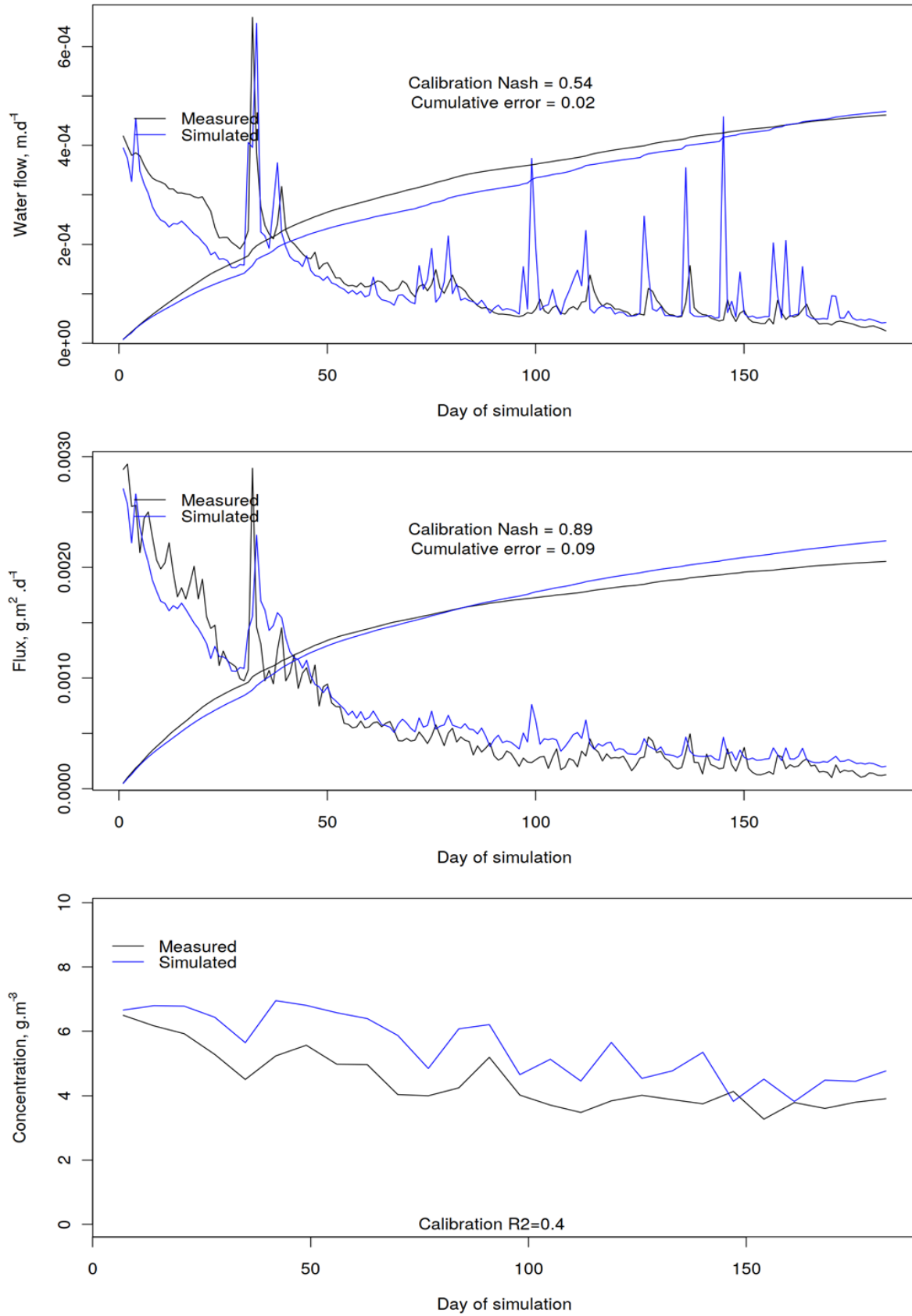


Figure 7: Anse d'Yffiniac. Focus sur 2010 (Mars - Septembre)

Gouessant

Le compromis a été plus difficile à choisir, et deux calibrations ont été **proposées**. La première a été retenue.

Compromis « meilleurs flux de N en général »

Bonne représentation de la dynamique générale, en particulier celle des concentrations saisonnières. Si les débits 2011 sont sous-estimés, ils ne sont pas nuls, et les flux sont bien présentés. Cette version a été retenue pour la suite des travaux.

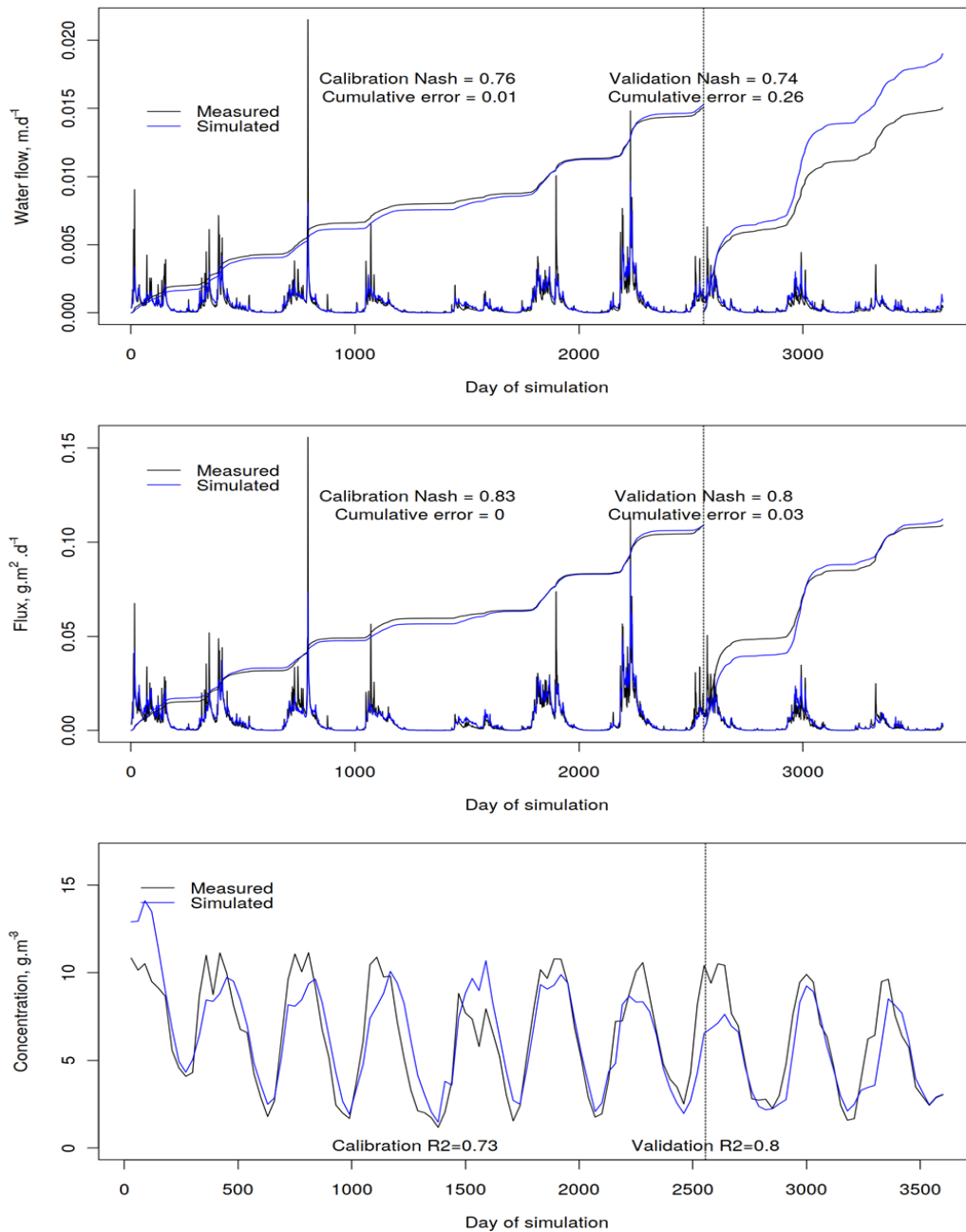


Figure 8: Gouessant, calibration / validation, 2008-2017

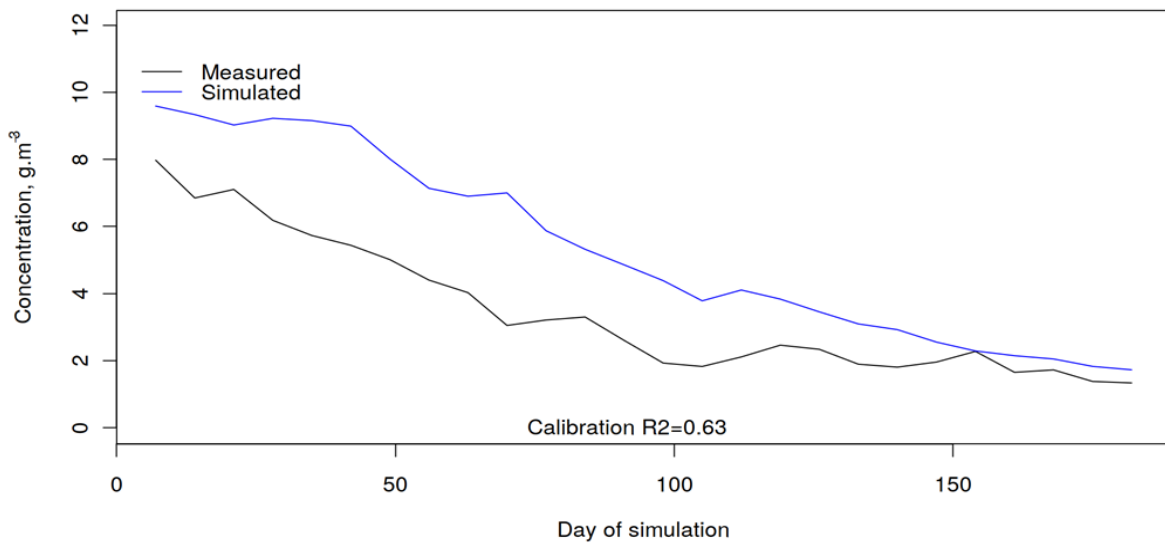
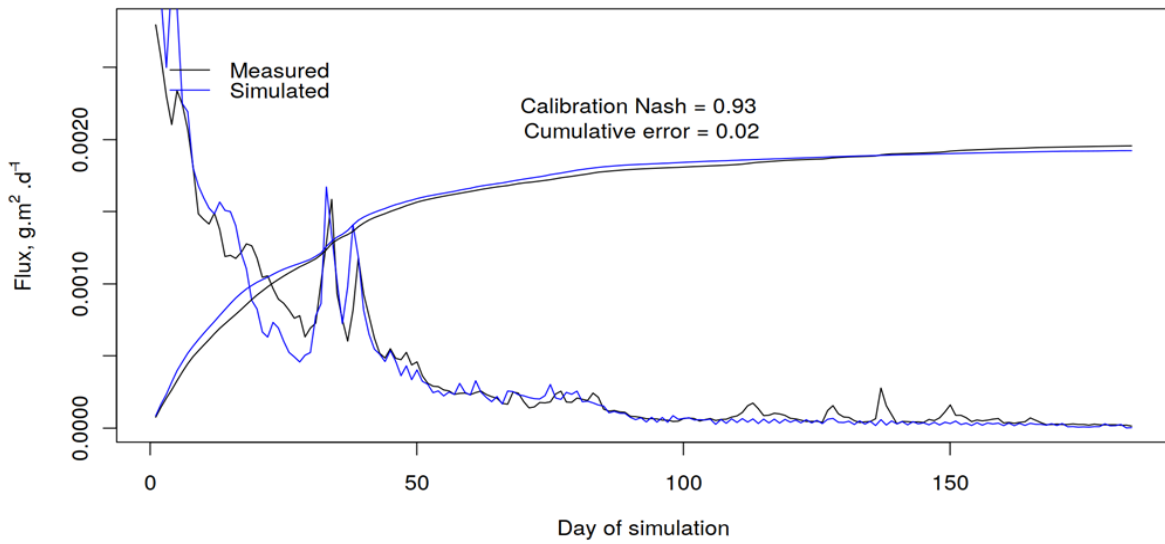
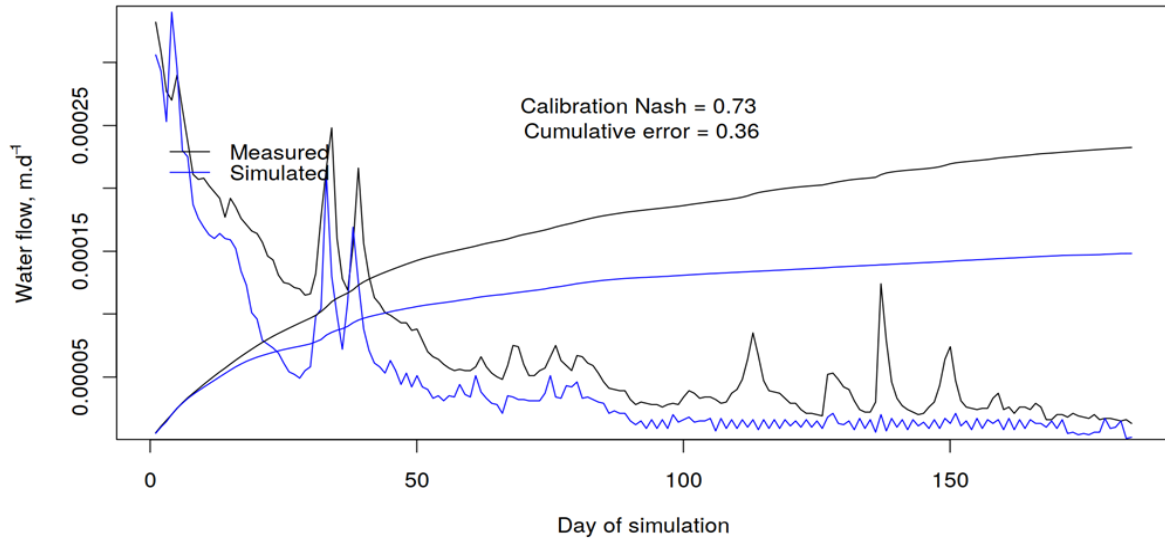


Figure 9: Gouessant, focus sur 2011 (Mars-Septembre)

Compromis « meilleur débits 2011 »

Si on se focalise plus sur les débits de l'année 2011, cette version apparaît plus satisfaisante. Par contre, la dynamique inter-saisonnière des concentrations est moins bien représentée, et on a tendance à surestimer les débits en 2016 et 2017.

Notons que, statistiquement, la différence avec le compromis précédent est « non significatif » (on est largement en dessous du niveau d'incertitude, évaluation par la méthode GLUE-Scheme). Cette version n'a pas été retenue pour la suite des travaux.

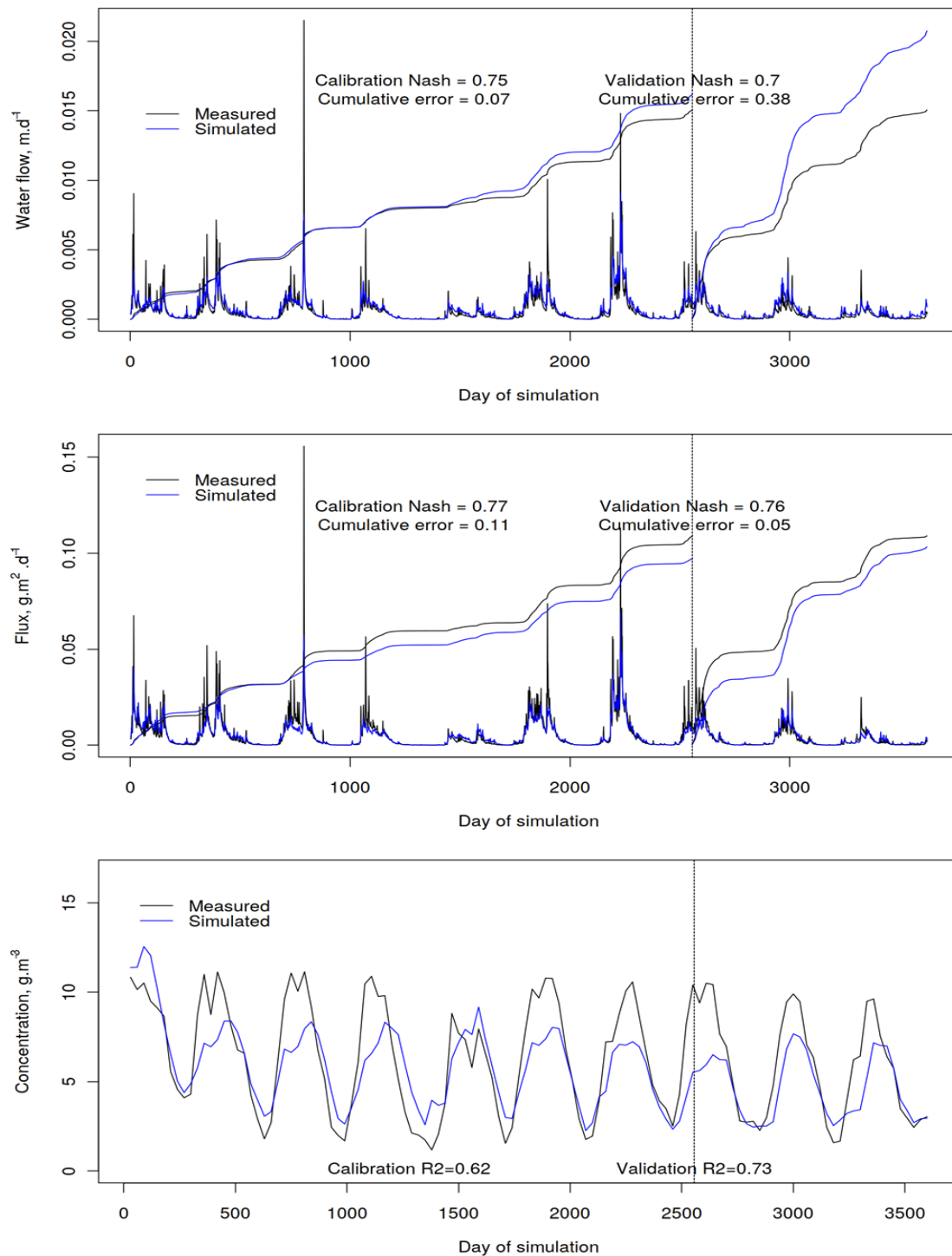


Figure 10: Gouessant, calibration / validation, 2008-2017

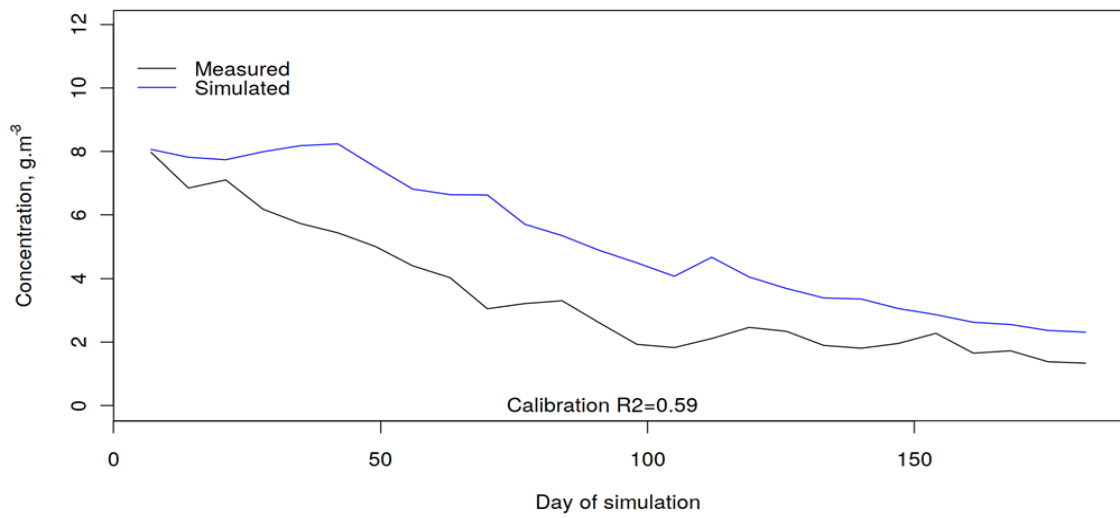
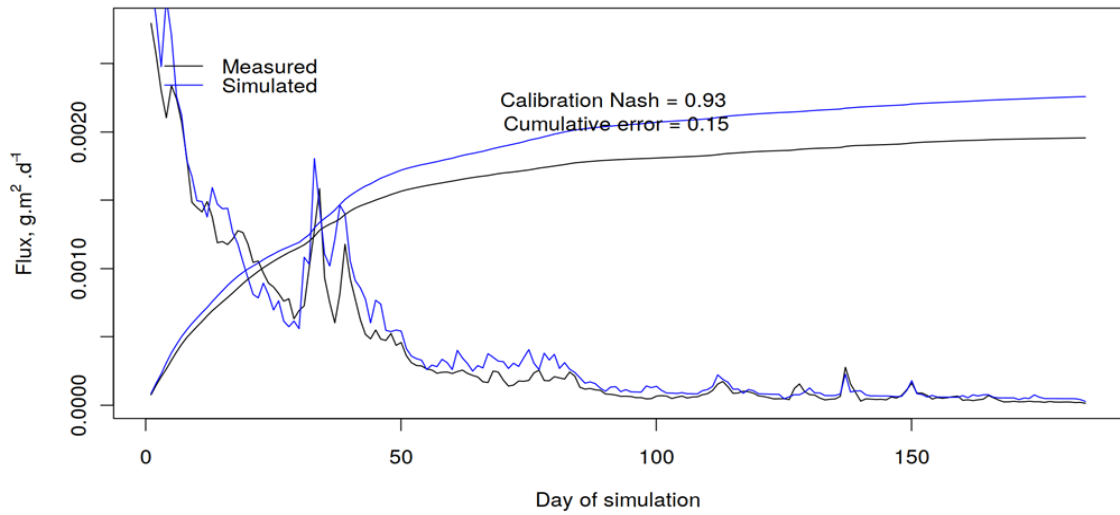
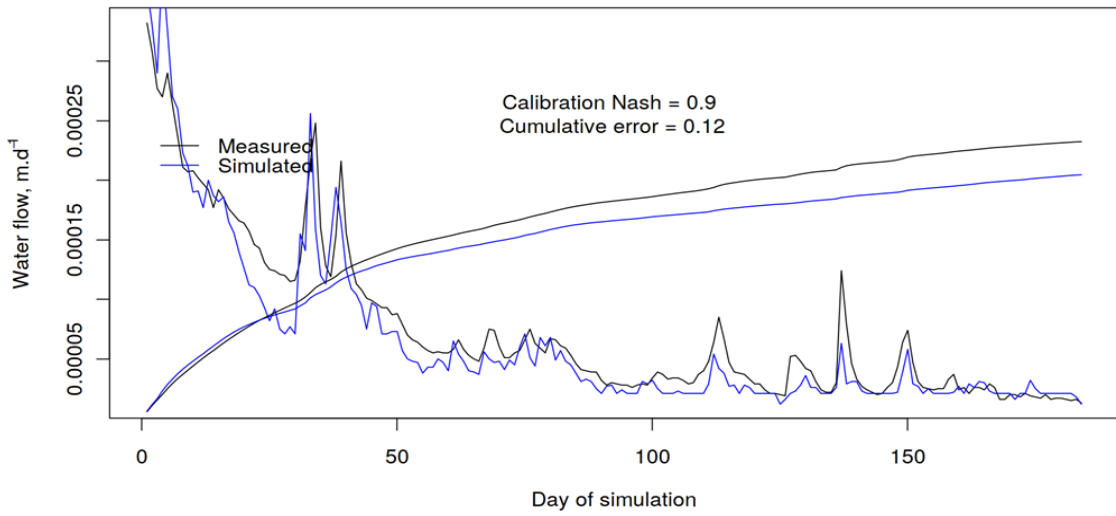


Figure11: Gouessant, focus 2011 (Mars - Septembre)

Exemple d'un cas de sur-calibration : des pistes pour expliquer les limites de TNT2

La simulation suivante présente un cas de « sur » calibration sur les débits en 2011. L'erreur (l'indice de Nash) reste équivalent aux autres simulations pour la période de calibration (2008-2015), et le set de paramètres choisi semble représenter très bien 2011. Par contre, l'erreur « effective » (la validation) augmente notablement (échelle non linéaire : un indice de Nash de 0,58, c'est « beaucoup » moins bien qu'un de 0,74 comme le premier compromis).

Ce résultat a été obtenu en augmentant le poids sur l'année 2011 par rapport aux autres calibrations. Cela pose les questions suivantes :

- la mesure de (petit) débit d'étiage est-elle incohérente entre 2011 et 2016-2017 ?
- le bilan de l'eau est difficile à boucler pour la période de validation, or elle correspond à une succession d'années sèches => dynamique souterraine modifiée ?
- Puisque les débits sont faibles, l'influence des actions de l'homme (captage-rejets), non pris en compte, devient-elle prépondérante ?

Compte tenu du contexte, la dernière hypothèse semble la plus probable.

Gouet

Le Gouet est le cas le plus problématique pour la simulation des débits d'étiages, de par l'absence de mesures à l'exutoire (chroniques reconstituées de façon empirique), et l'influence importante du milieu urbain (surface imperméabilisées, égouts (pilotés?), STEP...).

L'hydrogramme reconstitué présente des comportements atypiques, avec des effets de seuils, pouvant être dues à des stratégies de gestion des écoulements.

Si le bilan de l'eau, et les flux cumulés sont globalement bien représentés, les périodes d'étiages sont mal simulées dans le détail. Notons que nous pourrions représenter de façon lissée (moyenne mobile) les débits.

Nous avons proposé 2 compromis : un « général », et un « 2011 ». Le premier a été retenu pour la suite des travaux. Dans les deux cas, face aux incertitudes sur les données d'entrée, et les mesures, afin d'équilibrer le bilan de l'eau, des facteurs correctifs de 0.9 et 1.05 ont été appliqués aux chroniques de précipitations et d'ETP.

Compromis « général » retenu

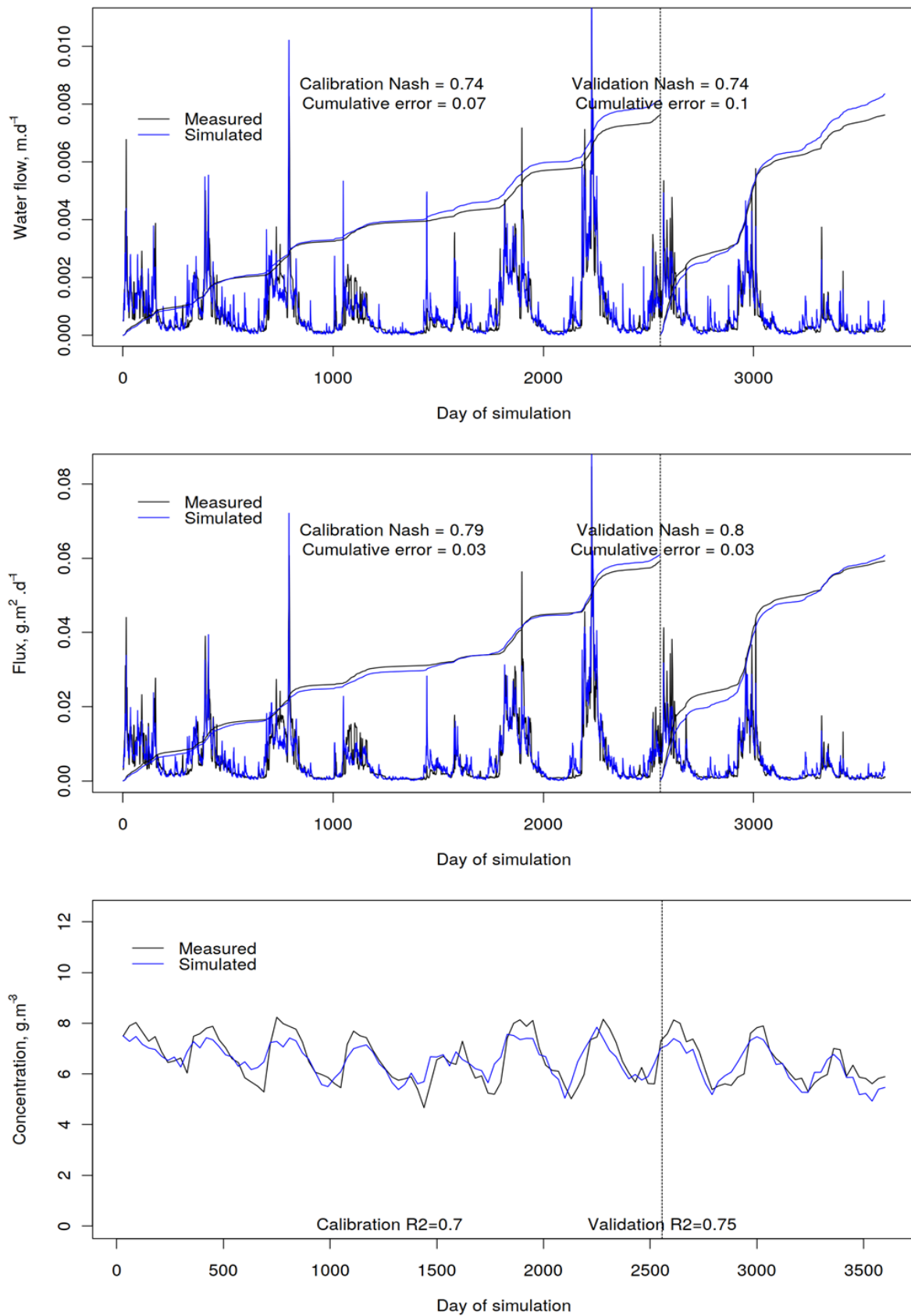


Figure 12: Gouet, calibration / validation, 2008-2017

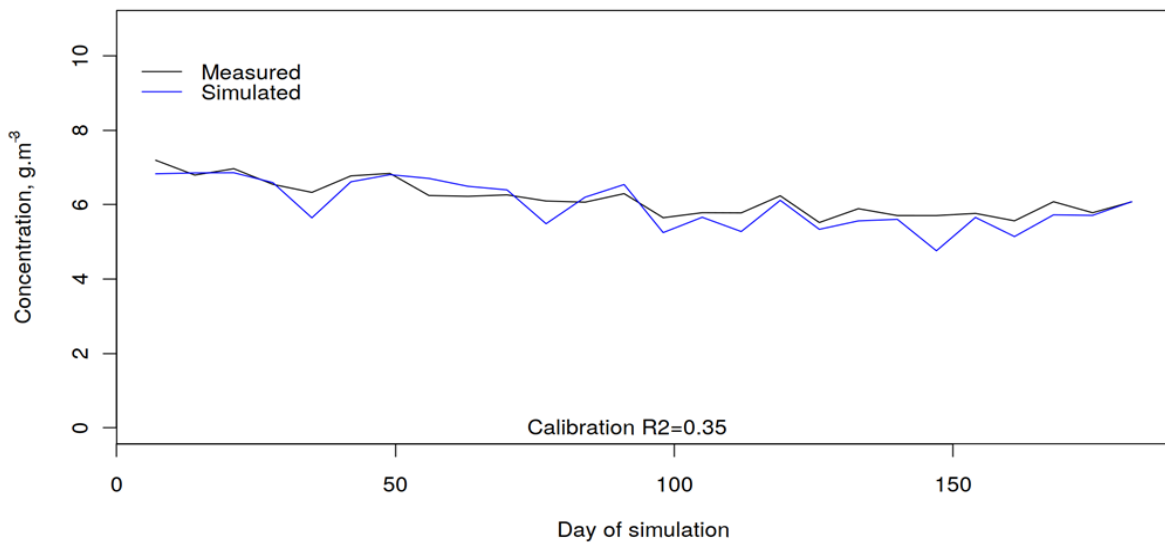
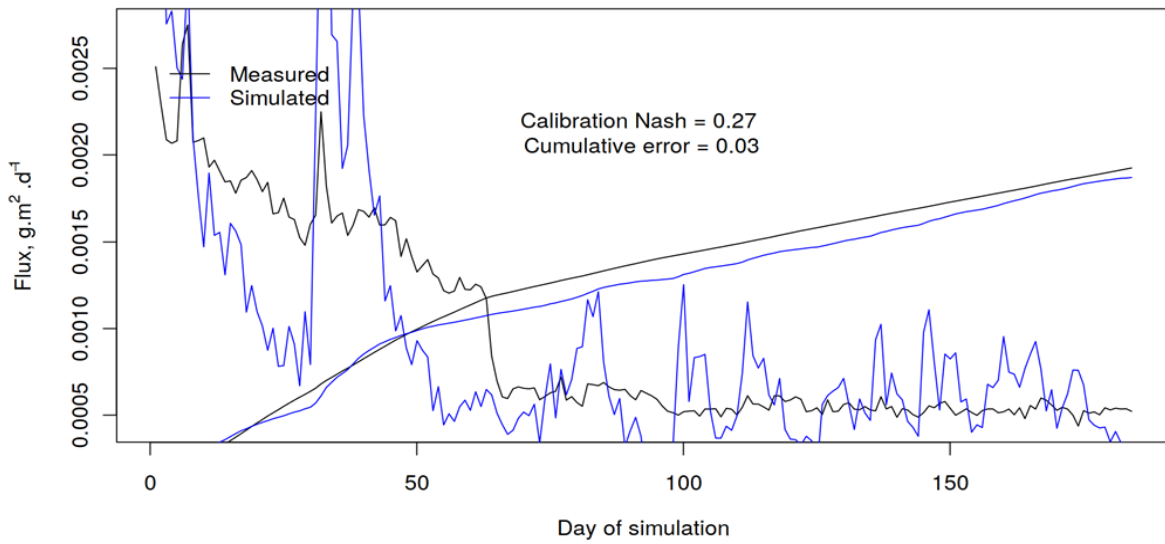
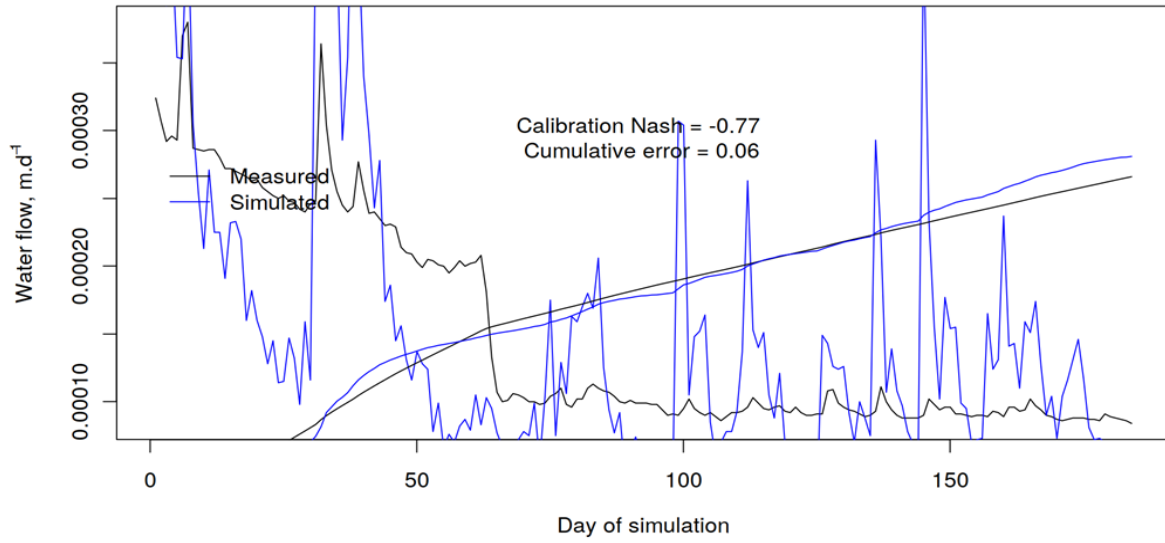


Figure 13: Gouet, Focus sur 2011 (Mars-Septembre)

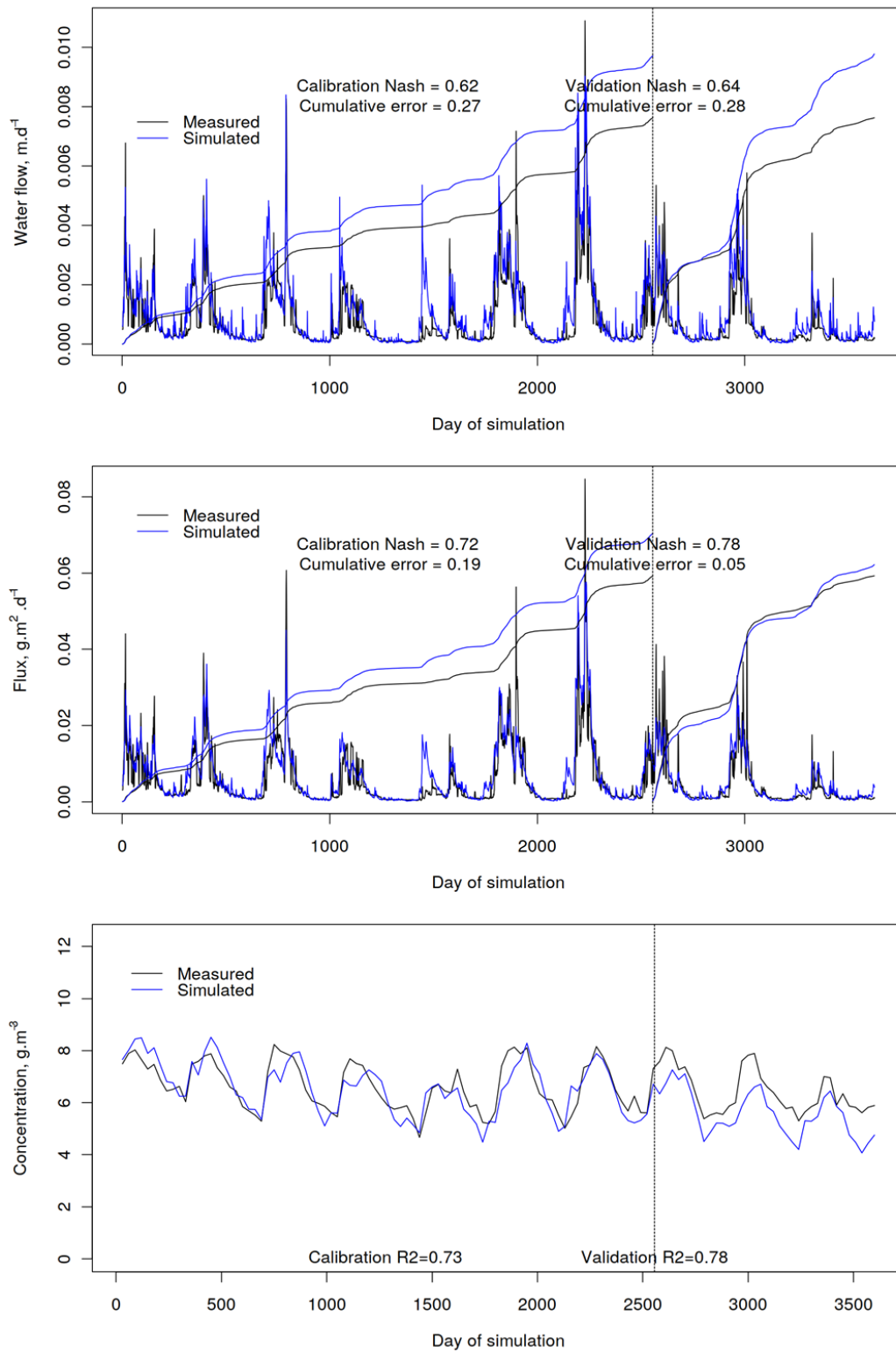


Figure 14: Gouet, calibration/validation, 2008-2017

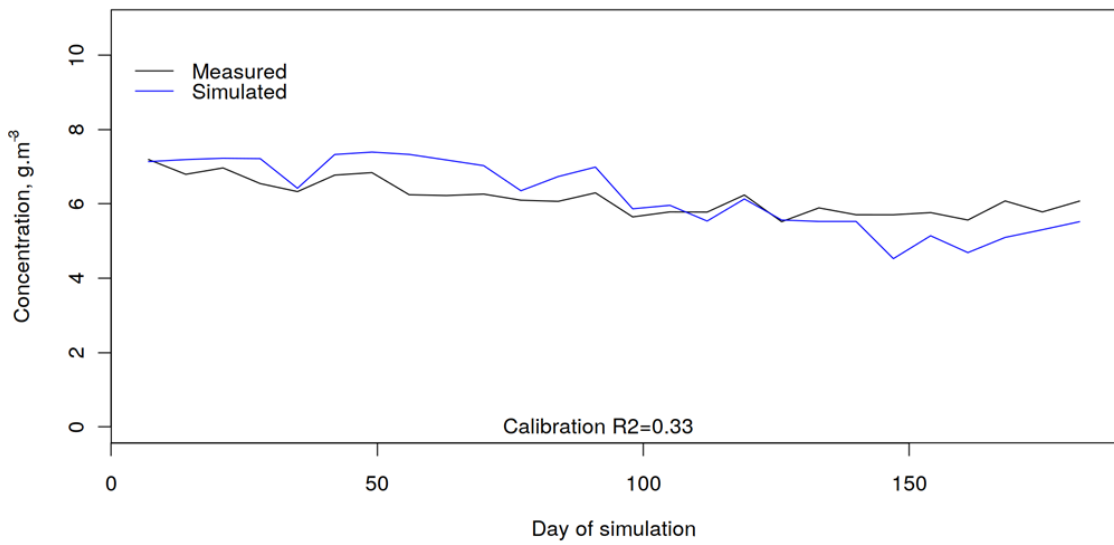
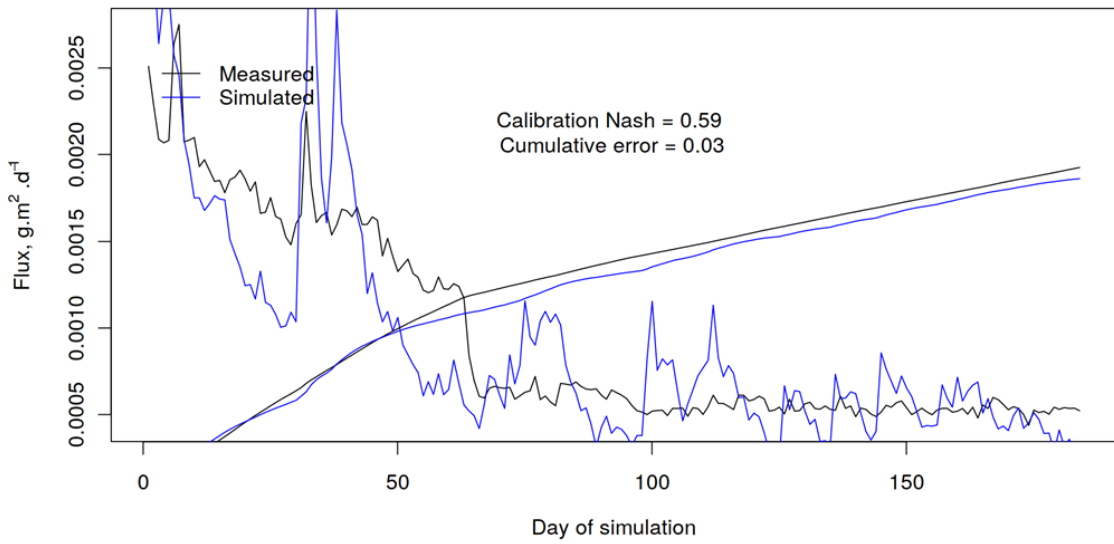
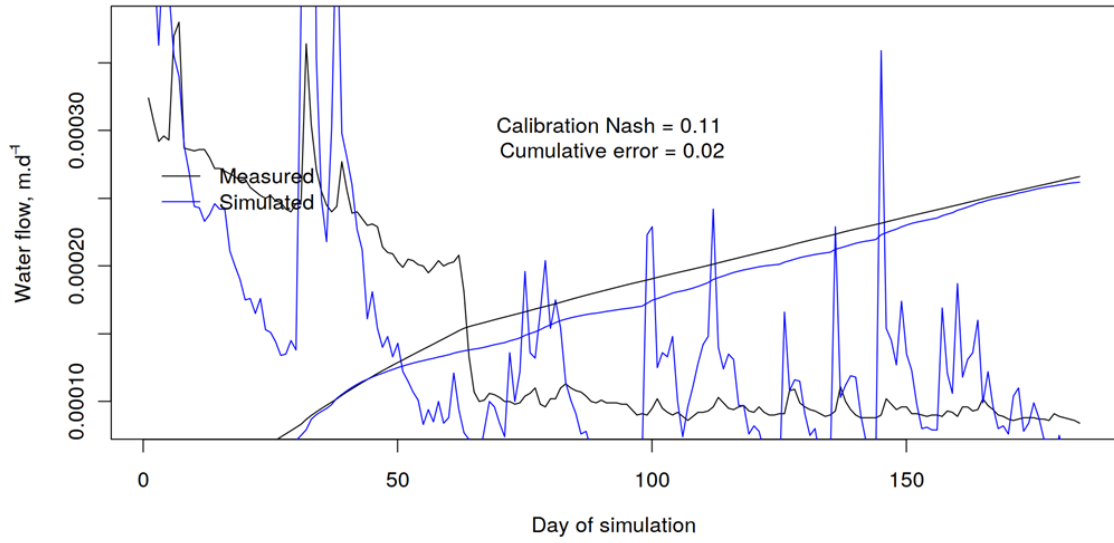


Figure 15: Gouet, focus sur 2011 (Mars - Septembre)

Performance du modèle : à nuancer par la qualité de la mesure

Si la tendance globale des concentrations est relativement bien représentée, la dynamique des concentrations journalières est potentiellement très mal échantillonnée par le dispositif de mesure (Figures ci-dessous, avec l'exemple du Gouessant). L'interpolation utilisée ici (et comme référence pour la calibration) est construite à partir d'un modèle statistique standard, afin de représenter une dynamique crédible. Il convient de relativiser la performance du modèle en prédiction, et de garder à l'esprit la faiblesse de la mesure.

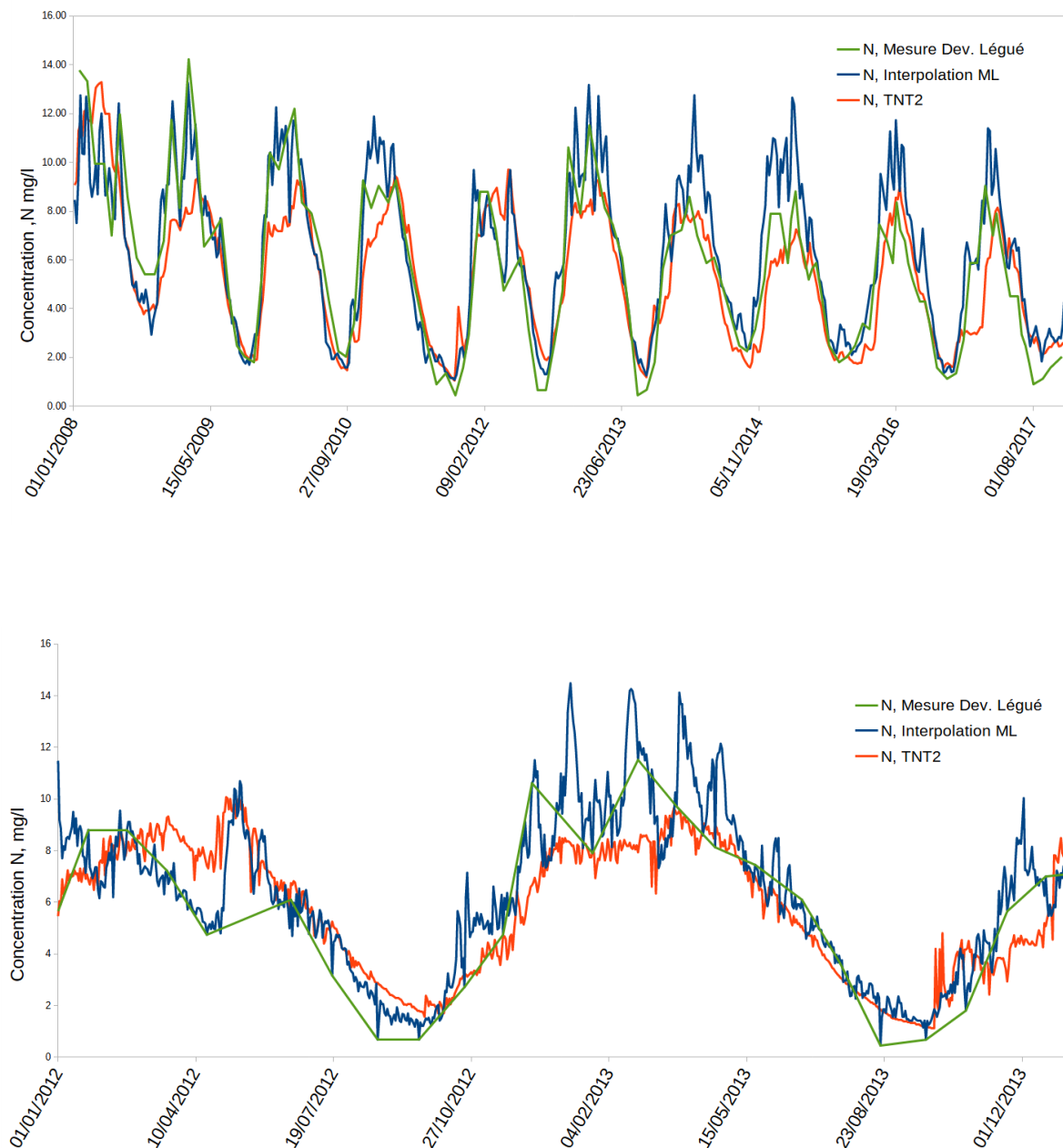


Figure 16: Exutoire du Gouessant, concentrations moyennes hebdomadaires :mesures, interpolations et modèle TNT2

Scénarios d'abattement des flux d'azote à l'exutoire des 3 bassins versants

Les scénarios explorés reprennent les objectifs de la Baie de Saint-Brieuc concernant les flux azotés pour les trois bassins versants à l'horizon 2036, avec un objectif prioritaire (corrigé car seuls 3 bassins versants sont concernés par l'étude, i.e. sans l'lc) de 109 T N pour la période estivale (mai-septembre), critique pour la croissance des algues vertes, et 710 T de N si possible pour l'ensemble de l'année. Ces objectifs correspondent à un abattement de 30 % des flux de référence. C'est cette valeur relative de 30 % qui nous guidera pour construire les scénarios.

L'analyse prospective complète s'effectue sur la période 2019-2036, en cohérence avec les objectifs de l'analyse MARS et les contraintes.

Afin d'atteindre l'objectif de 30 % de réduction des flux, l'idée est de remplacer les pratiques en priorité sur les zones les plus humides (d'après l'indice d'hydromorphie de Beven) par des prairies fauchées (il faut plusieurs fauches dans l'année, sinon l'effet est très limité), sans aucuns apports. Cette approche est très efficace d'un point de vue technique (les zones les plus humides d'un bassin versant sur socle imperméable, car elles interceptent l'ensemble des écoulements, ont le plus grand potentiel d'épurations), et impacte le moins de surface possible. Notons que ces prairies pourraient être productives, et dans ce cas, participeraient à une augmentation de l'efficacité globale de la fertilisation azotés sur le bassin versant.

Deux scénarios sont construits : un scénario « zéro » (sc0) qui constitue une continuité des pratiques agricoles existantes sur la totalité de la période (le scénario de référence), et un scénario 30 % d'abattement (sc30), qui simule l'application d'une mesure d'abattement en se focalisant sur les zones humides.

L'algorithme utilisé (et décliné dans un script informatique pour automatiser l'approche) et les différentes modalités sont les suivantes :

- Toute surface agricole (SAU) comprise dans les x% zones les plus humides de l'ensemble du bassin versant, hors forêts / bois, est passée en prairie fauchée non fertilisée.
- le pourcentage de surface les plus humides à transformer (x) est augmenté jusqu'à obtenir la réduction des flux souhaitée (l'effet cumulé sur les trois bassins versants doit être suffisant)
- Les changements d'occupation du sol s'appliquent à partir d'une année 2019 reconstituée, jusqu'au 31/12/2027, en utilisant comme référence les pratiques agricoles de la période « p3 » (celles à partir de 2012, correspondants à l'application du PLAV 1 et des dernières enquêtes).
- les chroniques climatiques sur la période 2019-2036 sont une copie des années 2001- 2018

Le scénario sc30

Après plusieurs essais, en considérant l'aspect « réaliste » d'une mise en place et étant donné qu'un seuil de 10 % apparaît suffisant pour atteindre les objectifs d'abattement à l'horizon 2027 pour la période estivale (> 30 % d'abattement), cette valeur a été gardée. Remarquons que cela n'est pas 10% de la SAU qui passe en prairie fauchée, mais moins. Cela dépend de la distribution spatiale des forêts et des zones urbaines, et donc du bassin versant. Le Tableau 1 récapitule les pourcentages effectifs de changement. Ces pourcentages ne reflètent pas forcément la réalité de terrains (approximations lors de l'attribution des occupations du sol initiaux), mais sont à garder à l'esprit si on veut comparer l'efficacité du scénario entre bassins versants. À noter que la diminution des autres occupations du sol se fait uniformément (pas de préférence d'allocation spatiale avec la méthode INRA/CSAM) : e.g. chaque culture autre que prairie diminue de 7,8 % sur le Gouessant. Cela mène mécaniquement à une baisse des intrants en proportion, sur l'ensemble du bassin versant. Ces pourcentages sont des valeurs moyennes calculées sur l'ensemble de la simulation, les surfaces évoluant chaque année selon la succession des cultures.

Bassin versant	10 % ZH		20 % ZH	
	Augmentation des surfaces en prairies, en part de SAU	Augmentation des surfaces en prairies, par rapport aux surfaces en prairies existantes	Augmentation des surfaces en prairies, en part de SAU	Augmentation des surfaces en prairies, par rapport aux surfaces en prairies existantes
Gouessant	+7,8 %	+13,1 %	+14 %	+22,3 %
Gouet	+6,1 %	+8,9 %	+10,4 %	+15,3 %
Anse d'Yffiniac	+3,6 %	+5,3 %	+9,0 %	+13,4 %

Tableau 1: Proportion effective de surfaces en prairies créées par un seuil de 10 % ZH (scénario sc30) et 20 % ZH. Moyennes sur la simulation.

Le Tableau 2 récapitule les flux de N moyens corrigés par l'hydraulicité (Méthode CEVA) à l'horizon 2036 pour les 2 scénarios. Notons l'objectif largement atteint pour la période estivale (abattement > 40 %). Néanmoins, il faut souligner l'absence d'étude de sensibilité / calcul d'intervalle de confiance sur cet aspect, et ne pas prendre ces résultats comme absolus, mais relatifs. Pour référence, nous avons mis les résultats pour un passage à 20 % de zones humides impactées. L'impact des 10 points supplémentaires est fortement amoindri, car principalement lié à un effet dilution (10 % de moins en fertilisation globale, mais pas ou peu d'interception de flux sur le chemin de l'eau).

Rappelons que l'objectif de l'exercice n'est pas de définir un plan d'action spécifique, mais de tester la sensibilité du système couplé terrestre-marin à une baisse crédible des flux de N, en particulier sur la période estivale.

Bassin Versant	Surface totale, km ²		Scénario	Flux Été, t N /an	Flux Total, t N /an
	SAU, km ²				
Yffiniac	130	99	sc0	22.4	233.3
			sc30 (10% ZH)	15.9	198.7
			20% ZH	14.6	195.5
			variation sc0 x sc30 (%)	71%	85%
			variation sc0 x 20% ZH (%)	65%	84%
Gouet	254	203	sc0	66.2	512.6
			sc30 (10% ZH)	43.5	330.7
			20% ZH	39.2	307.5
			variation sc0 x sc30 (%)	65%	65%
			variation sc0 x 20% ZH (%)	59%	60%
Gouessant	420	378	sc0	52.5	629.5
			sc30 (10% ZH)	24.4	441.3
			20% ZH	19.3	414.5
			variation sc0 x sc30 (%)	46%	70%
			variation sc0 x 20% ZH (%)	37%	66%
Ensemble	804	680	sc0	141.1	1375.4
			sc30 (10% ZH)	83.8	970.7
			20% ZH	73.1	917.5
			variation sc0 x sc30 (%)	59%	71%
			variation sc0 x 20% ZH (%)	52	67%

Période "été" == 1 mai au 30 septembre

Tableau 1: Flux moyen en 2036 (10 dernières années), corrigés par l'hydraulicité, des scénarios sc0 et sc30

Résultats détaillés

La Figure 3 présente le cumul des flux pour sc0 et sc30 jusqu'à 2036. Sur l'ensemble de la simulation, le bassin versant du Gouet est celui qui présente la plus grande efficacité du scénario sc30. En regardant l'évolution de l'abattement lié à sc30, le temps de réponse et sa mise à l'équilibre est plus rapide dans l'Anse d'Yffiniac. Le Gouessant réagit aussi vite, mais beaucoup plus intensément. Le scénario sc30 sur le Gouet, bassin sur granite partant avec des concentrations plus hautes, prend plus de temps pour être efficace. Les figures 4, 5 et 6 présentent l'évolution des quantiles 90 mensuels (Q90, 90 % des concentrations mensuelles sont inférieures) des concentrations à l'exutoire pour les 3 bassins versants. Le scénario sc30 réduit de façon nette et importante les pics de concentration (principalement estivaux), notamment sur les deux plus grands bassins versants, comme indiqué précédemment par le bilan des flux (Tableau 2).

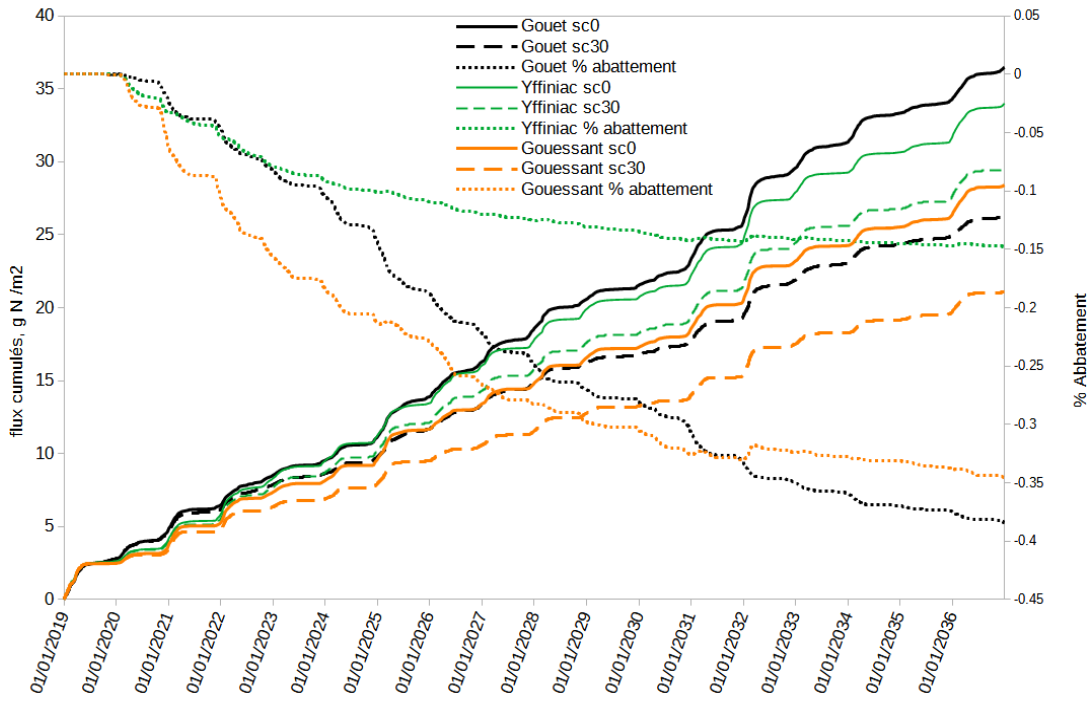


Figure 17 : flux nitriques cumulés aux exutoires des trois bassins versants selon les deux scénarios.

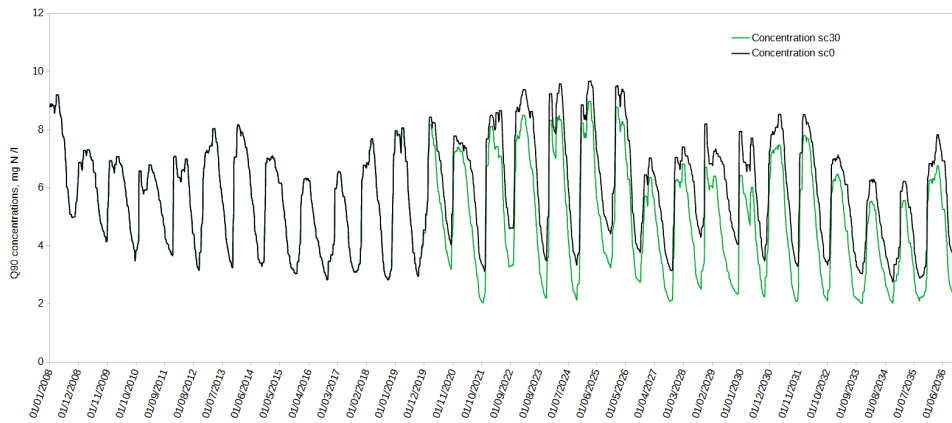


Figure 18: Q90 mensuel des concentrations, Anse d'Yffiniac.

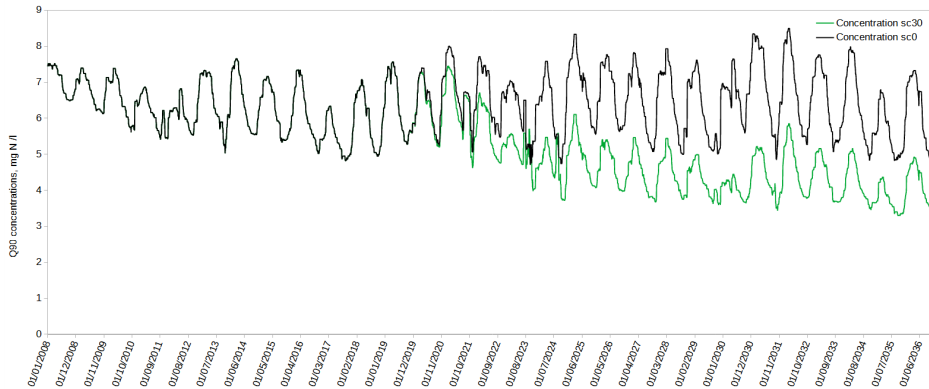


Figure 18: Q90 mensuel des concentrations, Gouet.

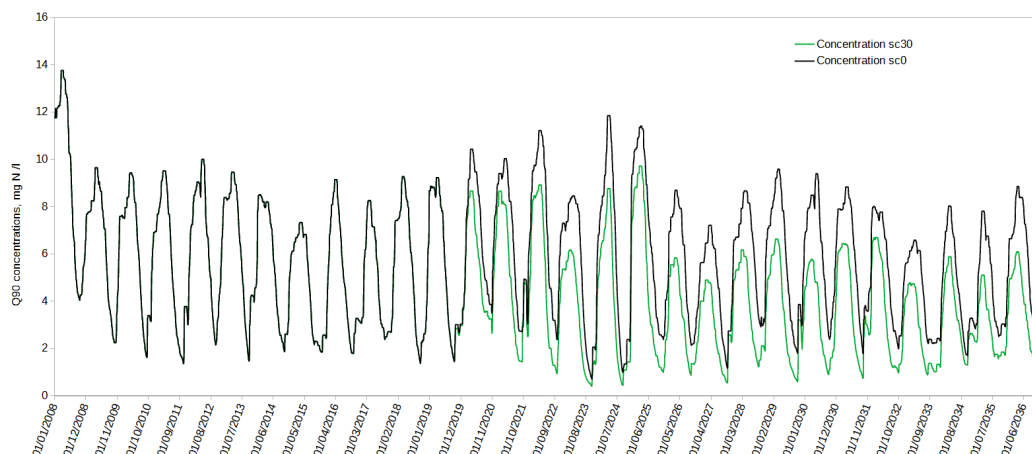


Figure 19: Q90 mensuel des concentrations, Gouessant.

Scénarios climatiques

Nous avons choisi les données de l'expérience CNRM2014, car c'est celle qui fournit des données pour trois scénarios et le plus de variables simulées.

Expérience	Institution	Modèle climatique Global *	Modèle climatique Régional **	Scénario CO2				Périodes disponibles	Nbr.de variables	Nom de la simulation	Méthode de correction et de descente d'échelle	DATE
				Hist	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5					
CNRM2014	CNRM	ARPEGE	ALADIN52	X	X	X	X	1950-2005 ; 2006-2100	9	CNRM - ALADIN52	Quantile-Quantile	mai 2013
IPSL2014	CNRM	IPSL-CM4A	WRF	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	5	IPSL - WRF	Quantile-Quantile	juillet 2014
EUROCORDEX	CLMcom	CNRM-CM	CCLM4-B-17	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	CLMcom-CNRM-CM5-CCLM4-B-17	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-B-17	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	CLMcom-MPI-ESM-LR-CCLM4-B-17	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	CNRM	CNRM-CM5	ALADIN53	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	3	CNRM-CNRM-CM5-ALADIN53	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	CSC	MPI-ESM-LR	REM0019	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	CSC-MPI-ESM-LR-REM0019	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	DMI	EC-EARTH	HIRHAM5	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	2	DMI-ICHEC-EC-EARTH-HIRHAM5	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	IPSL	IPSL-CM5A	WFR331F	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	5	IPSL-IPSL-CM5A-MR-WFR331F	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	KNMI	EC-EARTH	RACMO22E	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	KNMI-MetEir-EC-EARTH-RACMO22E	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	SMHI	CNRM-CM5	RCA4	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-CNRM-CM5-RCA4	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	SMHI	EC-EARTH	RCA4	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-ICHEC-EC-EARTH-RCA4	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	SMHI	IPSL-CM5A	RCA4	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-IPSL-CM5A-MR-RCA4	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	SMHI	MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-MOHC-HadGEM2-ES-RCA4	CDF-1	septembre 2014
EUROCORDEX	SMHI	MPI-ESM-LR	RCA4	X	X	X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-MPI-ESM-LR-RCA4	CDF-1	septembre 2014

Tableau 4 : Principales projections climatiques disponibles pour la région

Les simulations CNRM2014 sont issues du modèle à aire limitée Aladin-Climat. Les conditions aux limites latérales sont fournies au modèle Aladin-Climat par le modèle Arpege-global à grille entière, de résolution 50 km sur l'Europe. Un scénario de référence et trois scénarios RCP (Radiative Concentration Pathway) sont disponibles sur des périodes continues :

- ✓ la simulation de référence sur la période 1950-2005.
- ✓ les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2006-2100.

Les simulations Aladin-Climat mises à disposition sur le portail sont corrigées par la méthode quantile-quantile, par rapport à l'analyse SAFRAN. Ces simulations sont disponibles au pas de temps journalier sur une grille spatiale de 8km de côté.

La méthode de correction quantile-quantile

La correction quantile-quantile consiste à élaborer une fonction de correction pour ramener la distribution statistique des données simulées à celle des valeurs observées, pour chaque variable, saison et période concomitantes. Cette méthode non paramétrique revient à considérer que le modèle est capable de prédire la distribution des variables climatiques mais pas la valeur exacte de chaque quantile (Déqué et al., 2007). Chaque variable est corrigée indépendamment et au pas de temps quotidien.

Les scénarios RCP

Les scénarios RCP sont quatre scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300 (cf tableau ci-dessous). Leur sélection a été effectuée par les scientifiques sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature.

Qu'est ce que le forçage radiatif ? Exprimé en W/m^2 , un forçage radiatif est un changement du bilan radiatif (différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant) au sommet de la troposphère (situé entre 10 et 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat - comme la concentration des gaz à effet de serre.

Nom	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP8.5	>8,5W.m-2 en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100	croissante
RCP6.0	~6W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4,5W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à ~3W.m-2 avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Tableau 5 : caractéristiques des scénarios RCP

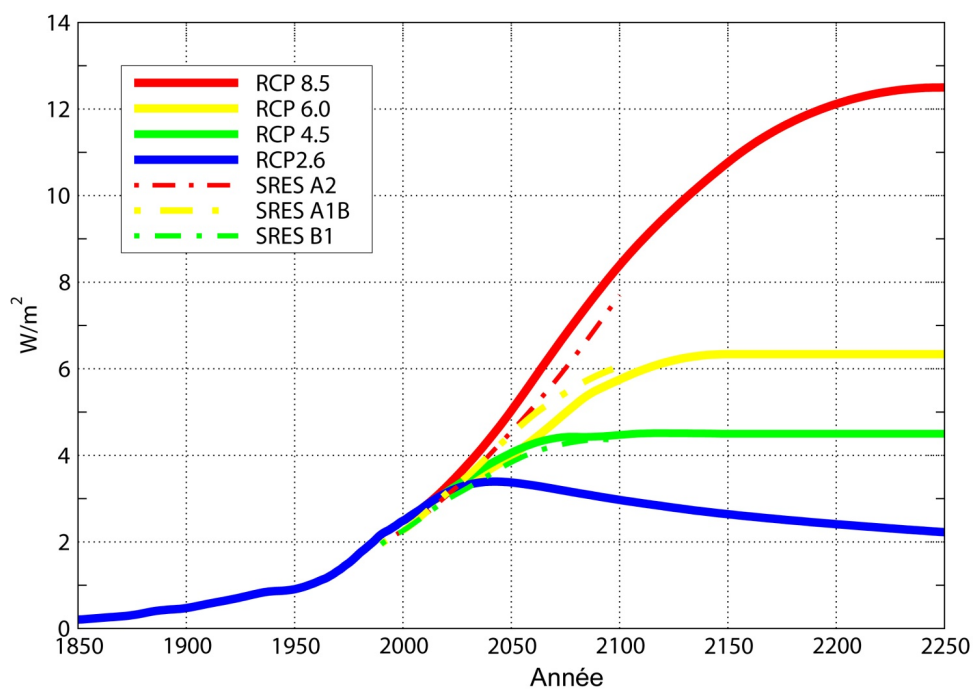


Figure 20 : évolution du forçage climatiques des scénarios du RCP et SRES

Si l'on compare les scénarios RCP aux scénarios SRES (cf. figure 20), on constate que le scénario RCP 8.5 est un peu plus pessimiste que le scénario SRES A2, le RCP 6 est proche du SRES A1B, tandis que le RCP 4.5 est proche du SRES B1. Le seul scénario sans équivalent est le RCP 2.6 qui intègre les effets d'une politique de réduction des émissions susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2°C en 2100.

La zone d'étude

Comme pour les scénarios à climat réel, le maillage SAFRAN a été utilisé. Pour analyser les tendances d'évolution, c'est le point en fond de baie qui a été choisi (en rouge, figure 21).

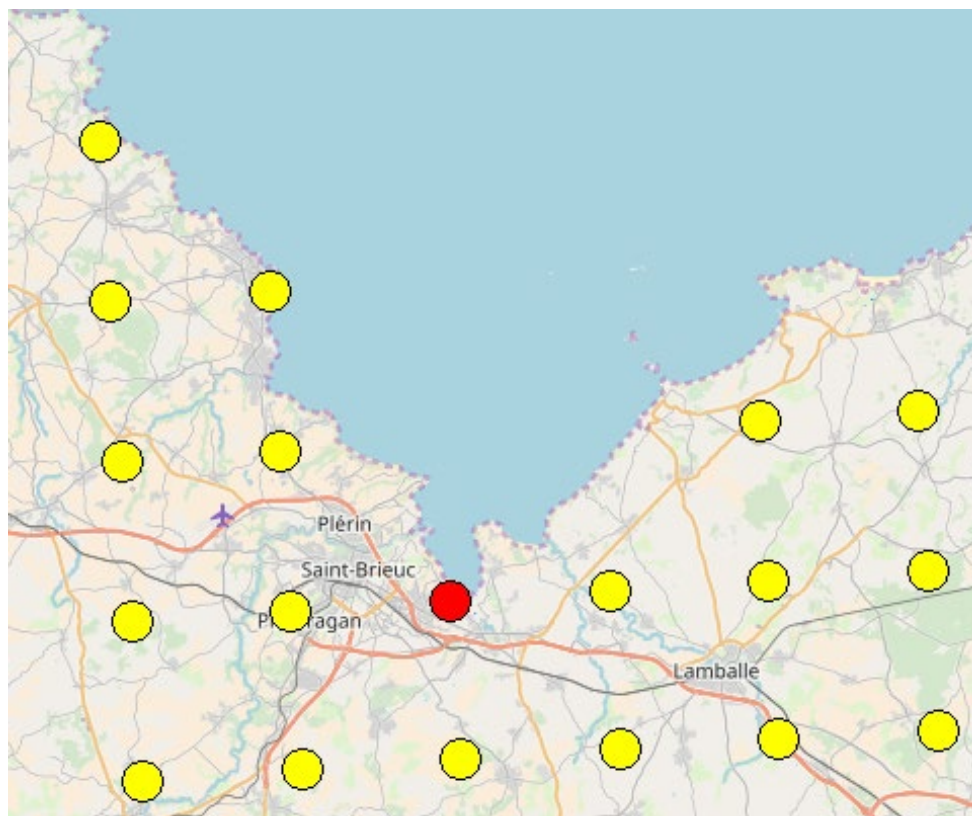


Figure 21 : maillage SAFRAN et point de référence choisi

Les données disponibles

Nom variable	Description variable
tasmin	Température minimale journalière à 2 m [C]
tasmax	Température maximale journalière à 2 m [C]
rstr	Precipitations liquides à grande échelle [mm jr-1]
huss	Humidité spécifique à 2 m [g/kg]
rsds	Rayonnement visible incident à la surface [W/m2]
rlds	Rayonnement infra-rouge incident à la surface [W/m2]
sfcwind	Vitesse du vent à 10 m [m s-1]
wsgsmax	Maximum journalier des rafales de vent à 10 m [m s-1]

Tableau 5 : maillage SAFRAN et point de référence choisi

Comparaison des 30 dernières années climatiques avec les projections 2030-2060 (Futur Proche) et 2060-2090 (Futur Lointain)

Précipitations annuelles

On compare ici la somme annuelle de chaque année d'une période (FP ou FL) à la médiane des sommes annuelles sur la période de référence (1976-2005).

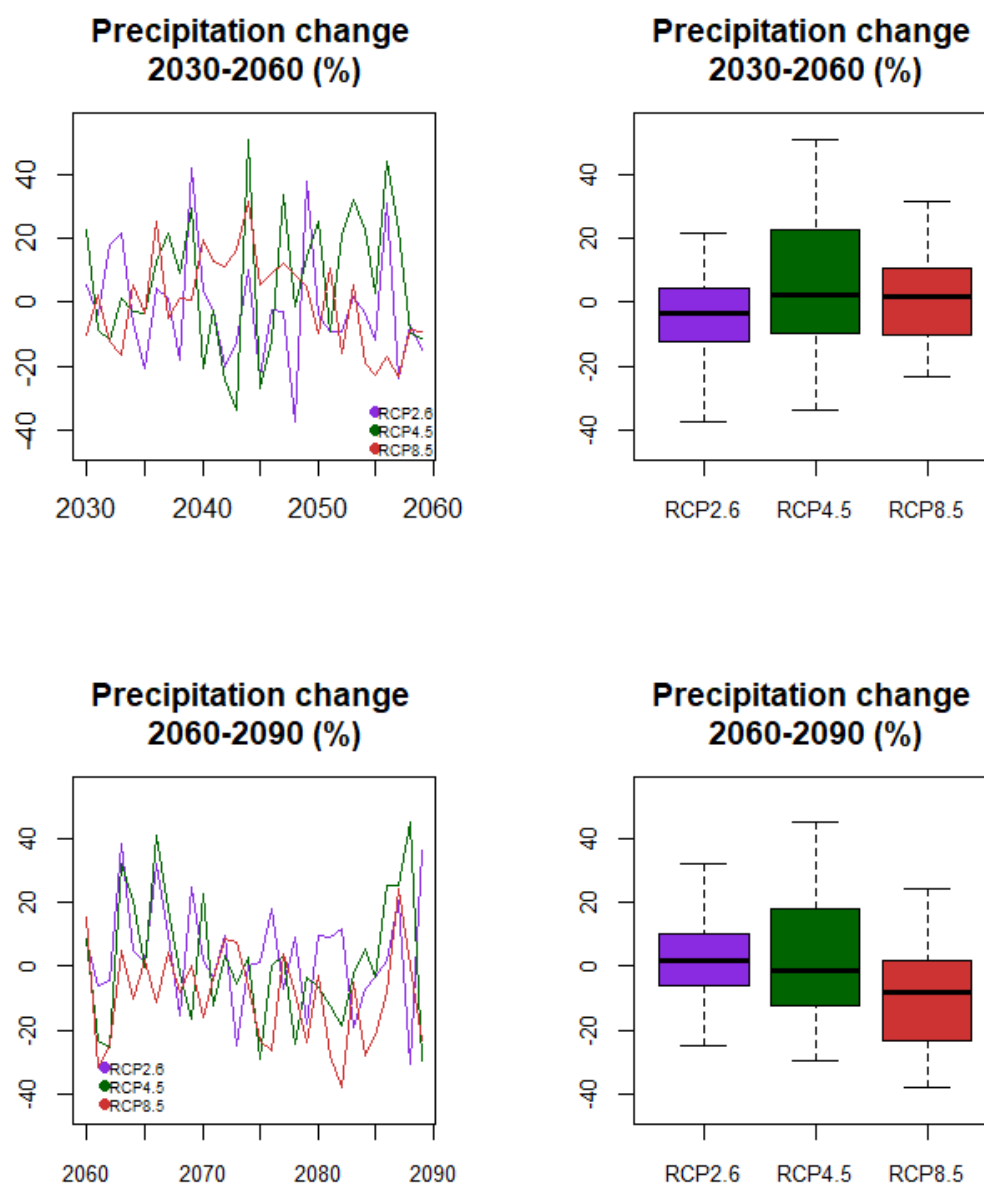


Figure 22 : Evolution des précipitations annuelles à deux horizons temporels dans les différents scénarios RCP

On voit que selon l'horizon temporel considéré, les conclusions sont différentes : pour le futur proche, pas de changement significatif, alors que pour le futur lointain on observe une tendance à la baisse, surtout pour RCP8.5. Dans le détail, il semble y avoir une tendance à la hausse des précipitations dans une première phase, jusqu'en 2045 environ, suivie d'une tendance à la baisse.

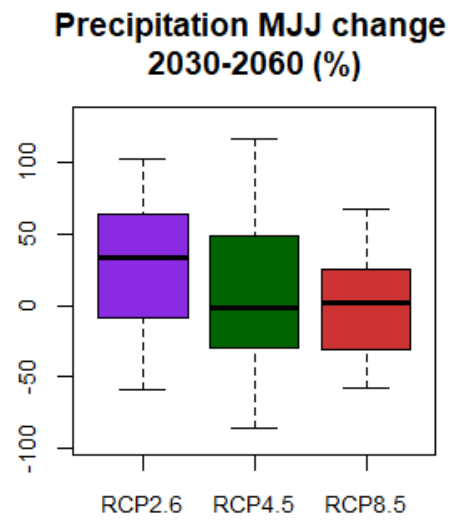
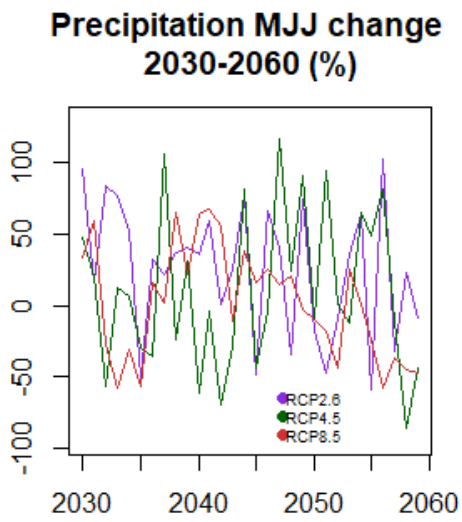
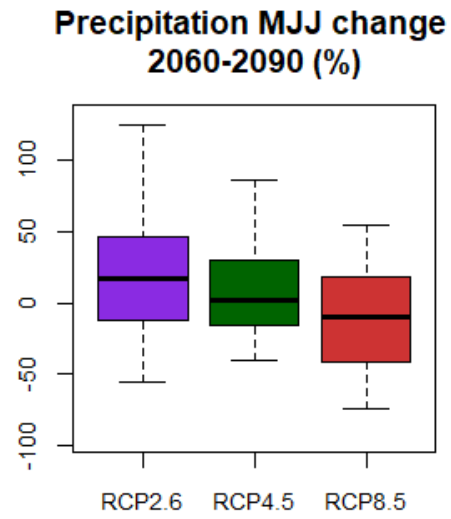
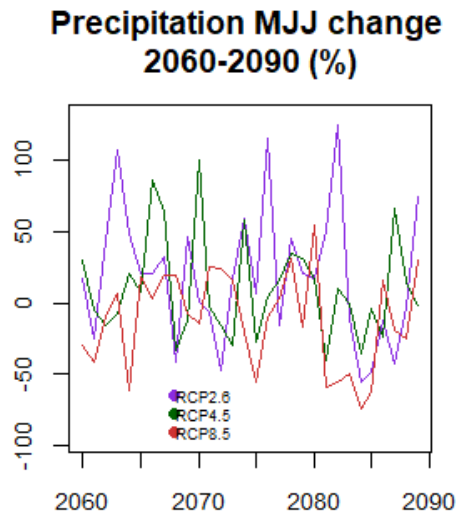


Figure 23 : Evolution des précipitations estivales à deux horizons temporels dans les différents scénarios RCP

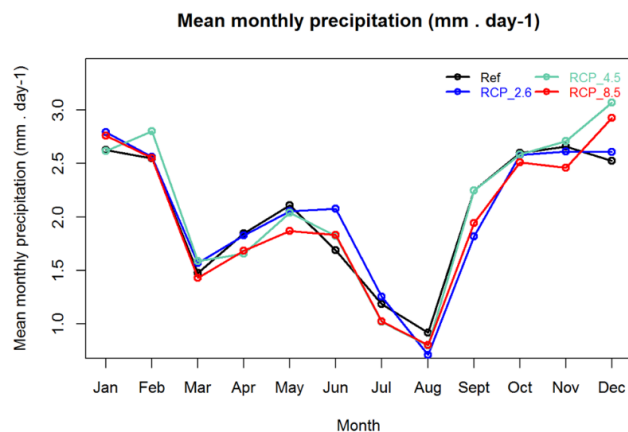


Figure 24 : moyennes des précipitations mensuelles dans les différents scénarios RCP

Même tendance pour les précipitations estivales, si ce n'est quelques années très sèches en tout début de période, pour le RCP8.5.

L'impression commune d'une tendance à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes orageux de début d'été, fondée sur les années récentes, n'est pas confirmée par les projections climatiques.

Rayonnement global sur la période Février-Avril

Ici on considère la somme de la variable 'rsds' (Rayonnement visible incident à la surface [W/m2]) sur la période Février à Avril (FMA) pour chaque année. Cette valeur est comparée à la médiane de toutes ces sommes sur la période de référence. Comme pour les précipitations, on observe d'abord une baisse du rayonnement, puis une remontée après 2045.

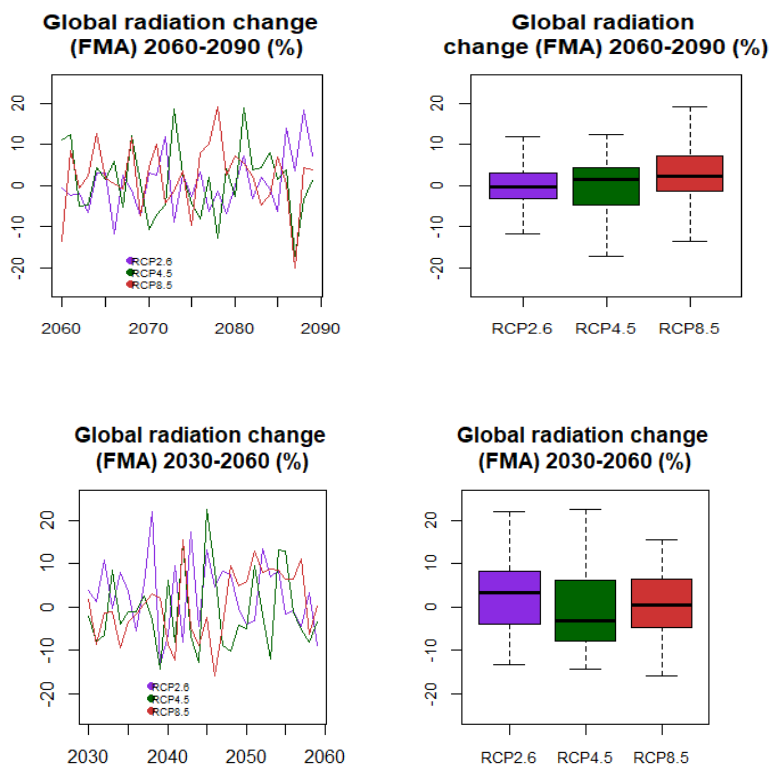


Figure 25 : évolution du rayonnement global à deux horizons temporels pour les scénarios RCP.

Quantile-90 des vents sur la période Nov-Mars

Ici on considère le Q90 de la variable sfcwind (Vitesse du vent à 10 m [m s⁻¹]) sur la période Novembre à Mars. On compare ensuite le Q90 de chaque année des périodes Futur Proche et Futur Lointain avec la médiane des Q90 sur la période de référence (1976-2005).

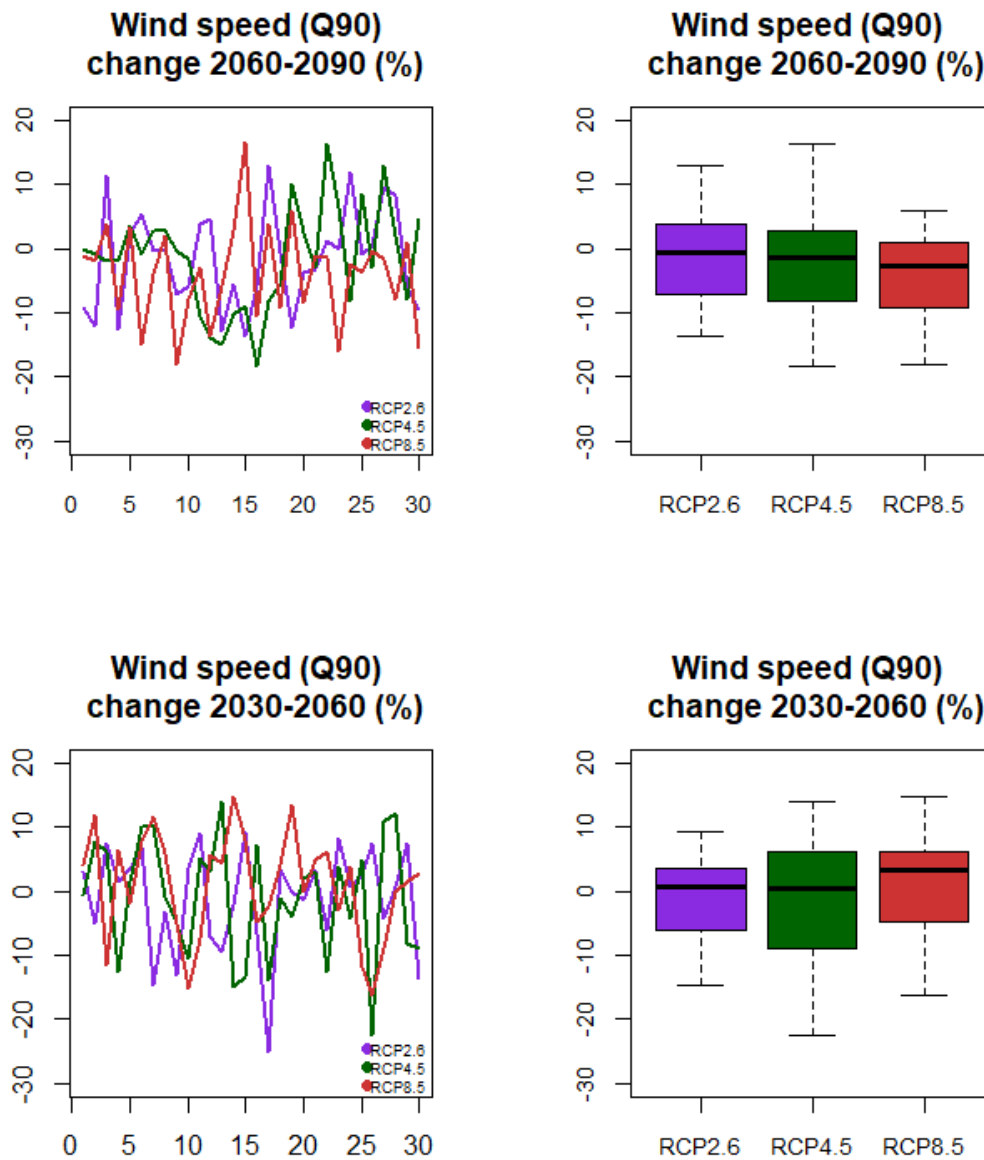


Figure 26 : évolution du rayonnement global à deux horizons temporels pour les scénarios RCP.

Les projections climatiques ne semblent pas mettre en évidence de modification de la fréquence des épisodes de forts vents pour les années à venir, voire même une tendance à la diminution pour le futur lointain.

Conclusions

Les projections climatiques ne semblent pas indiquer de tendance nette d'évolution des paramètres ayant une influence sur les flux d'azote terrigène ou sur le développement des algues, si ce n'est pour les températures et la teneur en CO₂ de l'atmosphère, qui augmente la photosynthèse et diminue l'évapotranspiration. Pour maximiser les effets possibles des changements climatiques tout en restant sur un horizon temporel assez proche, nous avons choisi d'utiliser les résultats du scénario RCP8.5 sur la période 2040-2070. Pour nos simulations TNT2, afin d'avoir un maximum d'années, nous remplaçons la période 2008-2036 par une projection climatique 2040-2068. En croisant avec les scénarios sc0 et sc30, cela permet d'avoir une idée du comportement du système dans un climat en changement, et d'évaluer dans quel sens pourrait évoluer la dynamique de l'azote.

Résultats des simulations TNT2

Dans un premier temps, une analyse statistique a été faite sur les 30 ans pour déterminer si des changements significatifs attribuables au changement climatique sont prédits par le modèle. Les résultats sur les flux annuels et estivaux sont illustrés dans les figures suivantes.

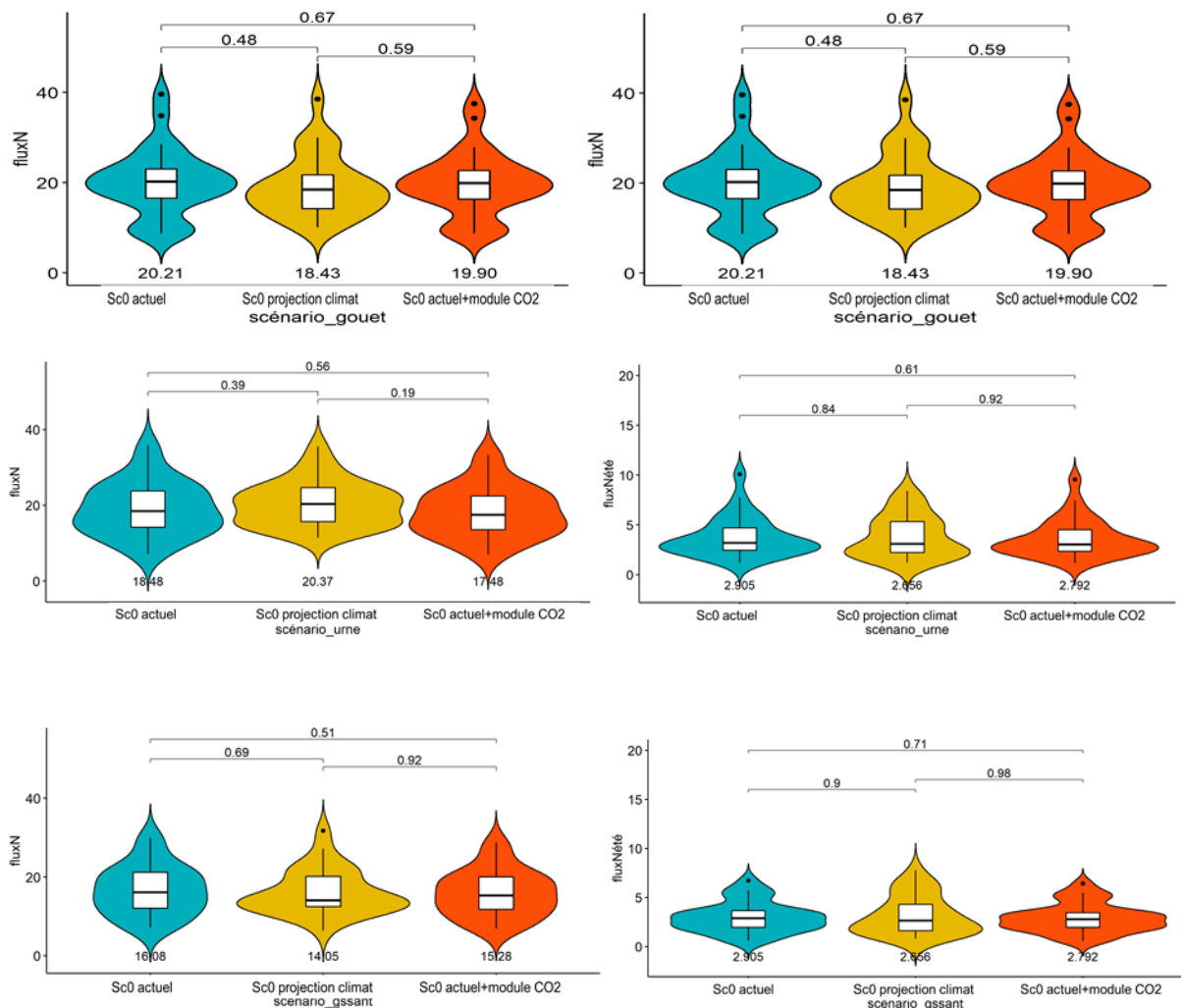


Figure 27 : comparaison des flux d'azote annuels et estivaux sur les trois bassins versant. Le scénario « Sc0 actuel+module CO₂ » mesure l'impact de l'activation du module de prise en compte de l'effet de la concentration en CO₂. Les nombres dans la partie haute du graphique correspondent aux p values du test de Wilcoxon : un nombre >0.05 indique une différence non significative entre les populations. Les nombres inférieurs sont les médianes.

On constate que les changements prédits ne sont pas significatifs. On constate simplement une légère diminution des flux, ainsi qu'une déformation des distributions vers les basses valeurs, notamment pour la période estivale. On peut donc considérer, en première approximation, que le changement climatique produirait une légère amélioration de la situation en termes de flux arrivant aux baies durant la saison de croissance des algues.

Dans un second temps, on a comparé les différences entre les scénarios sc0 et sc30 pour le climat actuel et le climat projeté. Pour ce faire, nous n'avons gardé que les 10 dernières années de simulation.

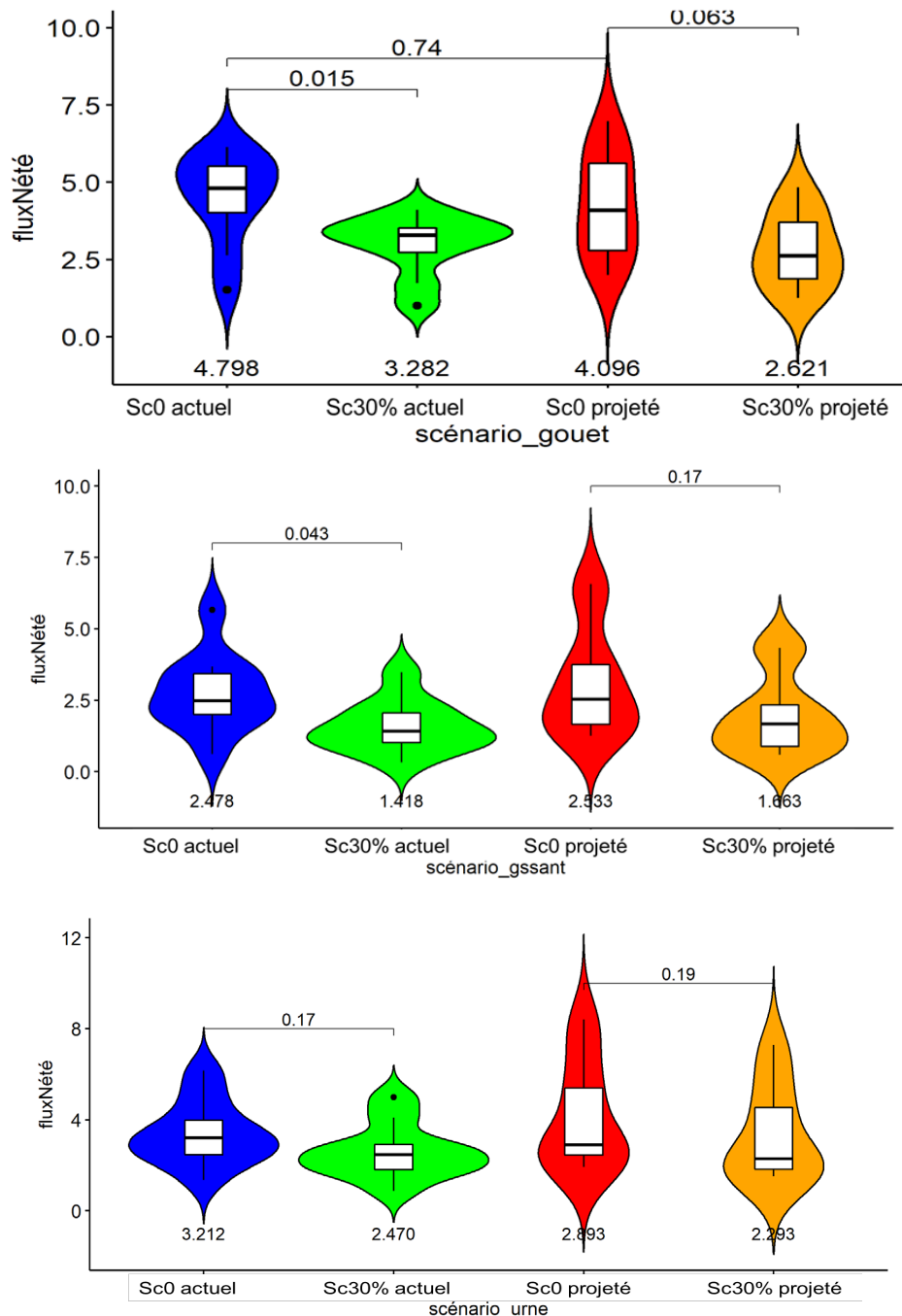


Figure 28 : comparaison des flux d'azote estivaux sur les trois bassins versant. Les nombres dans la partie haute du graphique correspondent aux p values du test de Wilcoxon : un nombre >0.05 indique une différence non significative entre les populations. Les nombres inférieurs sont les médianes.

Ces résultats montrent que l'abatement devient moins significatif pour les scénarios climatiques, notamment du fait de l'accroissement fort de la dispersion des résultats. En effet, les valeurs absolues des différences entre sc0 et sc30 ne varient pas significativement. La tendance mise en évidence ici est donc simplement une augmentation de variabilité annuelle, et donc de l'aléa. A titre indicatif, sont représentées ci-dessous les chroniques de Q90 des concentrations et les flux cumulés

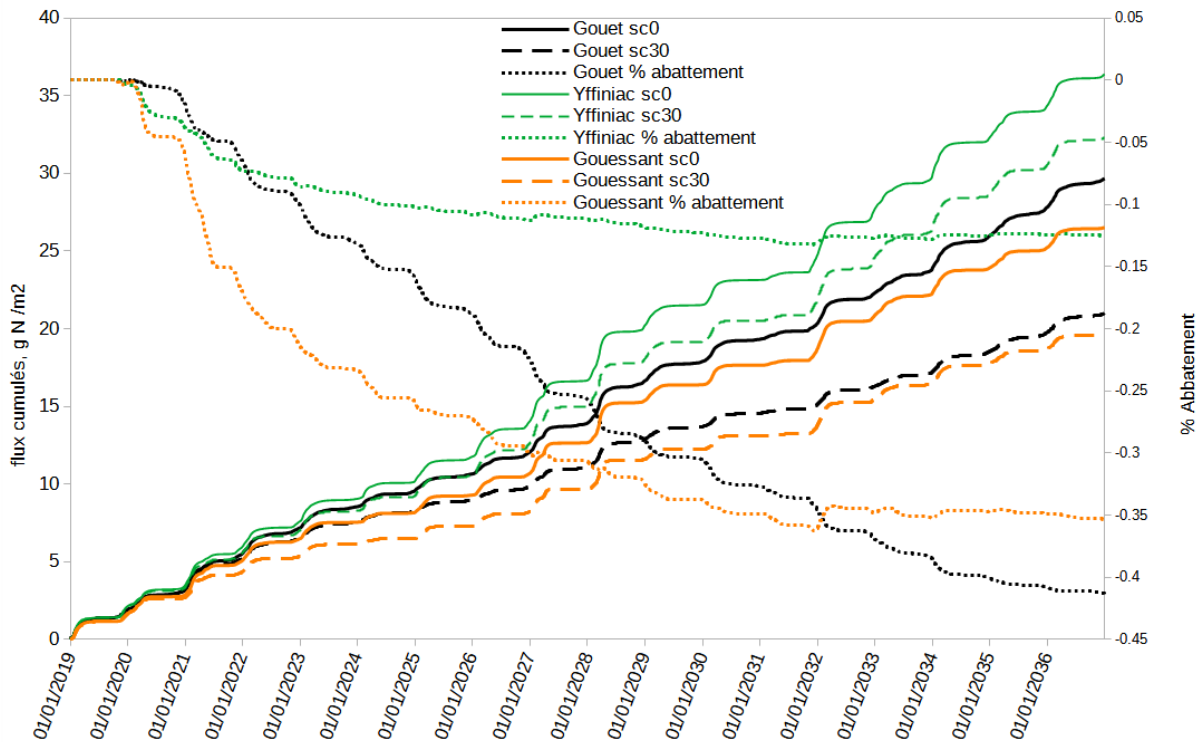
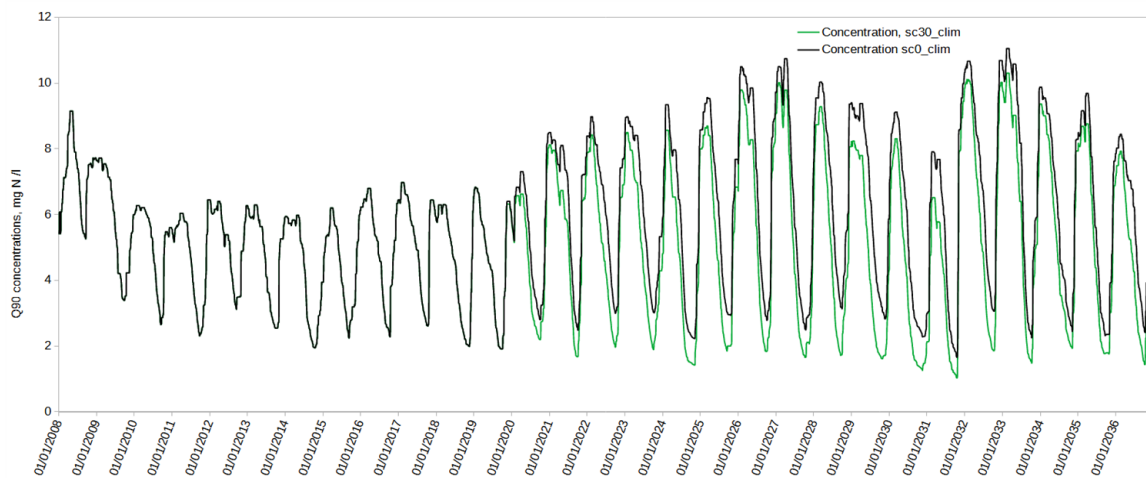
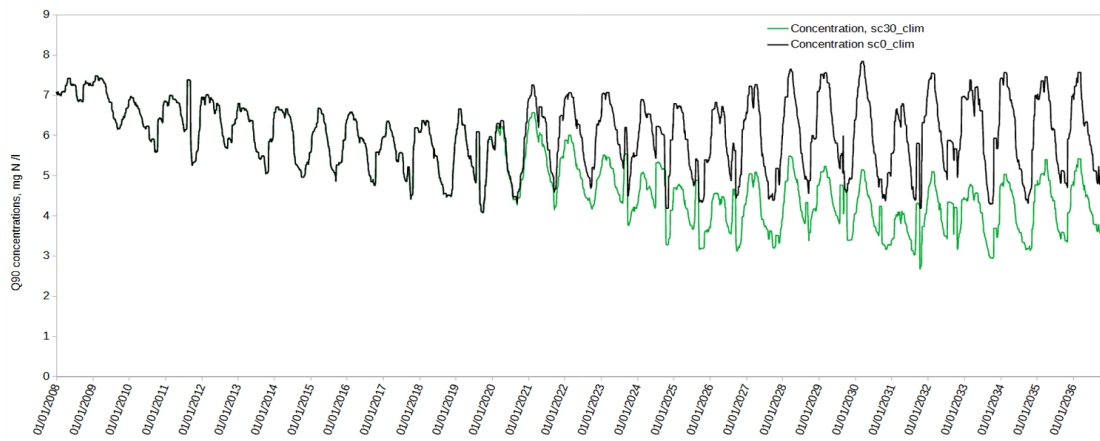


Figure 29 : flux nitriques cumulés pour les scénarios climatiques

Yffiniac



Gouet



Guessant

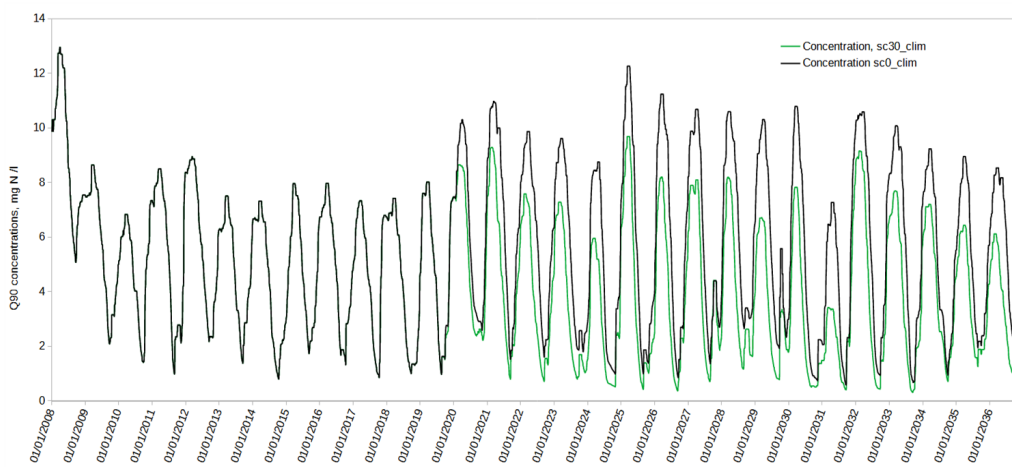


Figure 30 : Q90 des concentrations pour les scénarios climatiques

Couplage Ecomars-Ulves et TNT2 : synthèse des résultats

rédaction commune CEVA-INRAE-SCHEME

Remarque préliminaire

L'obstacle principal auquel cette étude s'est heurtée est la forte incertitude entachant la mesure des flux arrivant à la baie. Nous tenons à souligner le fait que, pour avoir une meilleure connaissance du phénomène, de son évolution, et du résultat des efforts entrepris pour lutter contre les marées vertes en baie de St Brieuc, il serait indispensable de disposer de mesures de débits et de concentrations de bonne qualité, et avec une fréquence suffisante en été, le plus en aval possible.

Rappel des résultats majeurs

Le couplage des deux modèles permet de simuler de façon acceptable les variations interannuelles de l'ampleur des échouages d'ulves en baie de Saint Brieuc sur la dernière décennie, caractérisée par des années très contrastées et pas vraiment de tendance nette. Les simulations, tout comme les données mesurées, confirme la forte dépendance aux flux entrants de l'ampleur des marées vertes, notamment dans la seconde moitié de l'été.

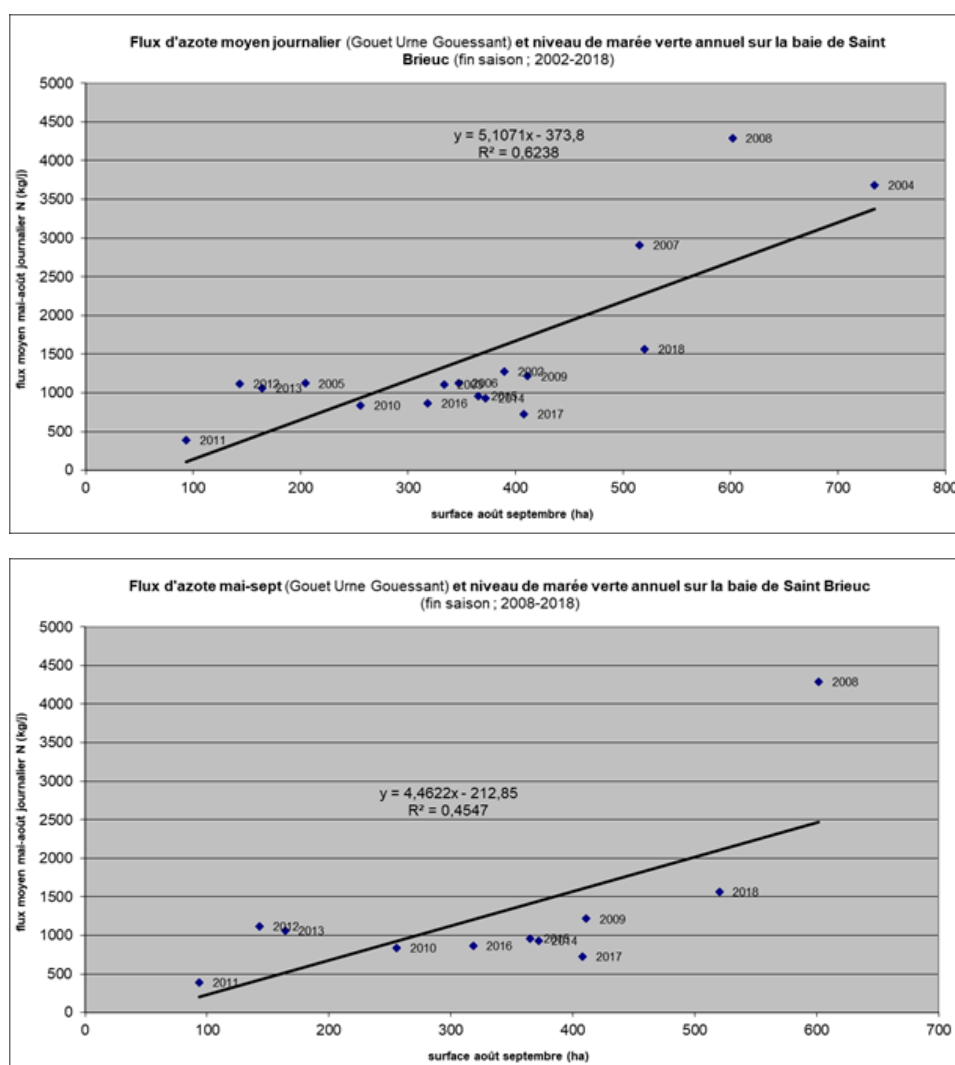


Figure 31. Relation entre flux d'azote mai-sept arrivant à la baie et surface couverte en août-septembre : données mesurées (haut) et simulées (bas).

Il est aussi confirmé que, à l'inverse, le début de saison est fortement dépendant de la reconduction des stocks hivernaux et des conditions climatiques, avec peu ou pas d'influence des flux terrigènes.

De ce fait, la simulation de baisses de flux très conséquentes (>30% en moyenne) des flux estivaux se répercute de façon très atténuée sur les biomasses (diminution de moins de 10%) et ne semble pas permettre d'atteindre le bon état écologique (au sens DCE) de la masse d'eau littorale. Il y a toutefois un lien net entre ces deux abattements, que ce soit en relatif ou en absolu (fig xx).

NB : cette conclusion est provisoire compte tenu de la surestimation des biomasses de fin d'été par Ecomars-3D, voir p. suivante

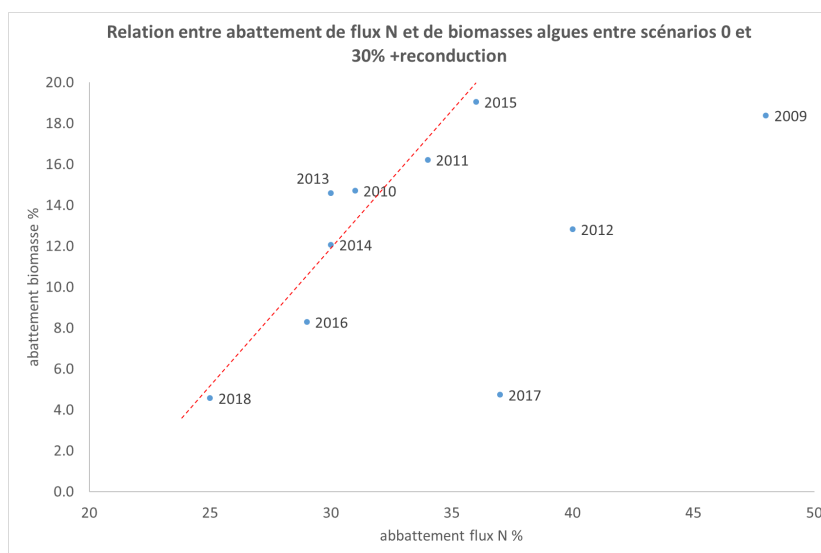


Figure 32 : relation entre l'abattement de flux estival et de biomasse algale : $(sc_{30}-sc_0)/sc_0$

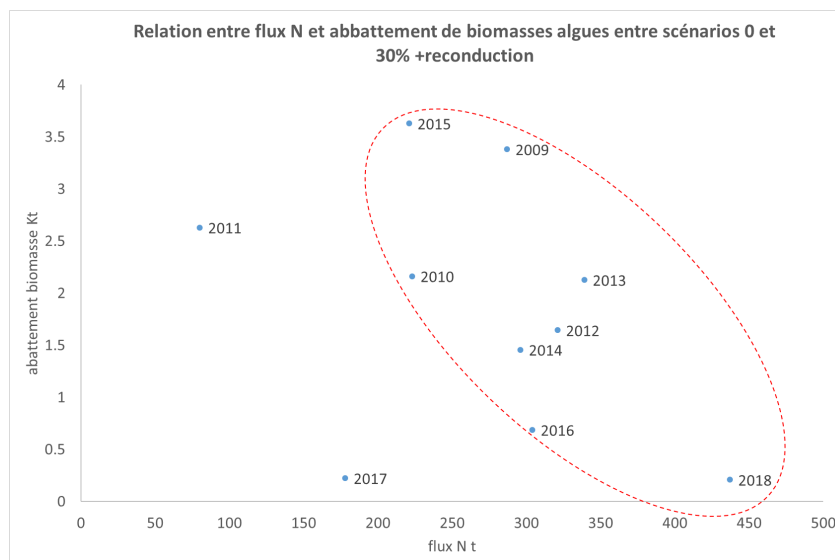


Figure 33 : relation entre l'abattement le flux estival sc_0 et l'abattement de biomasse algale : $(sc_{30}-sc_0)/sc_0$

Dans les deux cas, on constate que l'année 2017 échappe à la tendance, ce qui est logique car cette année se caractérise par un stock de fin d'hiver extrêmement fort qui conditionne l'ampleur de la marée verte indépendamment du flux terrigène.

Enfin, l'analyse des effets des projections climatiques à 30 ans nous permet de conclure, en l'état actuel des connaissances, à une absence d'effet direct du changement climatique sur le phénomène : en effet, dans l'hypothèse de pratiques agricoles inchangées, les flux terrigènes ne semblent pas devoir évoluer significativement, tout au plus une légère baisse des médianes et une

augmentation de la variabilité interannuelle peuvent être observées. Mais, dans le même temps, l'augmentation des températures de l'eau pourrait induire une légère augmentation de la biomasse en ulves. La résultante serait donc plus ou moins nulle. Par contre, il faut rappeler que cette analyse porte sur les effets directs du changement climatique, et il y a fort à parier que des évolutions beaucoup plus marquées, et difficiles prévisibles, sont à prévoir sur la même période du fait des effets des changements globaux dans leur ensemble sur l'activité agricole et la ressource en eau dans la région.

Quel écart entre modèle et réalité observée?

La comparaison avec les mesures, d'une part, des flux simulés par TNT2, d'autre part, des biomasses et des surfaces en ulves simulés par Ecomars-Ulves montre que les variations interannuelles sont bien modélisées et que la plupart des simulations sont cohérentes avec les observations. Nous pouvons toutefois identifier trois écueils qui n'ont pu totalement être évités :

-pour TNT2, la simulation des flux estivaux, notamment pour le Gouet, accuse parfois de grands écarts avec les valeurs estimées à partir des observations, le plus souvent dans le sens d'une surestimation (2012 et 2017 notamment), et parfois dans le sens d'une sous estimation (2010 notamment). Cet écart n'est pas systématique, indiquant plutôt une incertitude aléatoire qu'une erreur conceptuelle. Incertitude qui, d'ailleurs, peut-être pour partie due à la méthode d'estimation des flux à partir de mesures qui ne permettent pas une mesure précise. Il est à noter que ces écarts ne se répercutent pas sur les simulations de biomasses de façon évidente.

-Pour Ecomars-Ulves, une tendance à la surestimation systématique des biomasses en fin de saison et, surtout, des surfaces d'échouage dès le mois de juillet. Ceci est lié essentiellement à l'absence de prise en compte de facteurs pouvant concourir à la destruction de la biomasse d'ulves : ramassage, mortalité, dispersion par la houle, voire broutage. ***Pour cette raison, il est possible que l'effet des scénarios, notamment sur la reconduction et donc les conditions de reproduction des blooms d'une année sur l'autre, soit sous-estimé. Il a été convenu qu'une suite serait donnée à l'étude pour tenter de corriger ce biais.***

-Pour le modèle couplé, une assez faible sensibilité du modèle (en termes de biomasse ou de surface d'échouage), pour une année donnée, à une diminution de flux simulé par le scénario de baisse de flux. Les raisons en sont multiples, et l'on peut citer notamment :

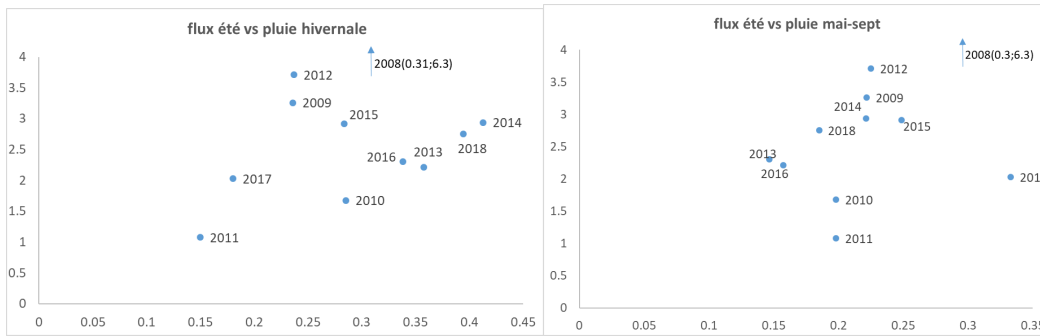
- ✓ les autres sources d'azote pour les algues, supposées ici constantes : flux de NH₄ et de N organique, apport par les sédiments de la baie notamment.
- ✓ l'absence de prise en compte des autres espèces d'algues pouvant apparaître à la faveur d'années défavorables aux ulves, et pouvant ensuite entrer en concurrence avec les ulves.

Synergies et antagonismes entre processus terrestres et côtiers

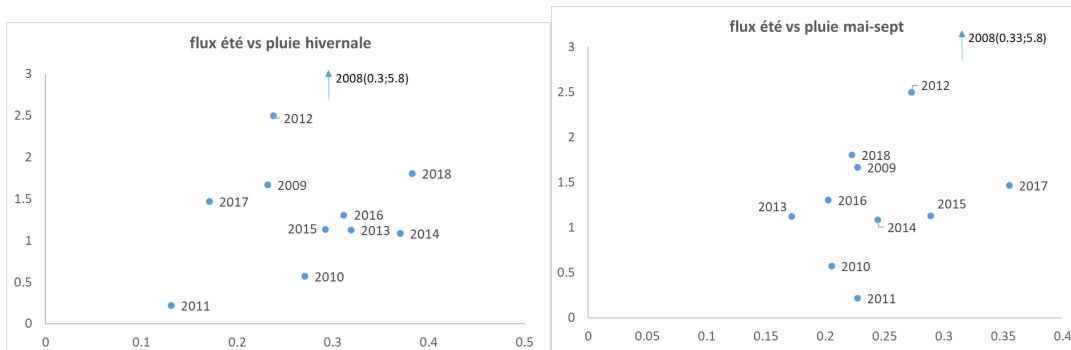
L'analyse des variations interannuelles des biomasses d'ulves met l'accent sur l'importance de l'état des stocks de début de printemps, eux-mêmes fonction des perturbations hivernales, qui contrôle la précocité de la marée verte, et sur celle des flux estivaux, qui contrôle le maintien de la marée verte en deuxième partie d'été.

Or, on constate que les flux estivaux, sont souvent fortement liés aux pluies hivernales, qui permettent le soutien des étiages via les stocks souterrains. Il y a donc semble-t-il antagonisme de l'effet d'hivers très perturbés qui, d'un côté, sont défavorables à la reconduction des stocks, et, de l'autre, sont favorables au maintien de la marée verte en été. 2018 est un exemple caractéristique de ce type d'antagonisme. Notons toutefois que les flux estivaux sont aussi influencés par les pluies sur la même période, et donc qu'une combinaison entre un hiver peu perturbé et des pluies estivales forte est un cumul de circonstances favorables aux algues, tel qu'en 2008 ou 2017.

Gouet



Guessant



Yffiniac

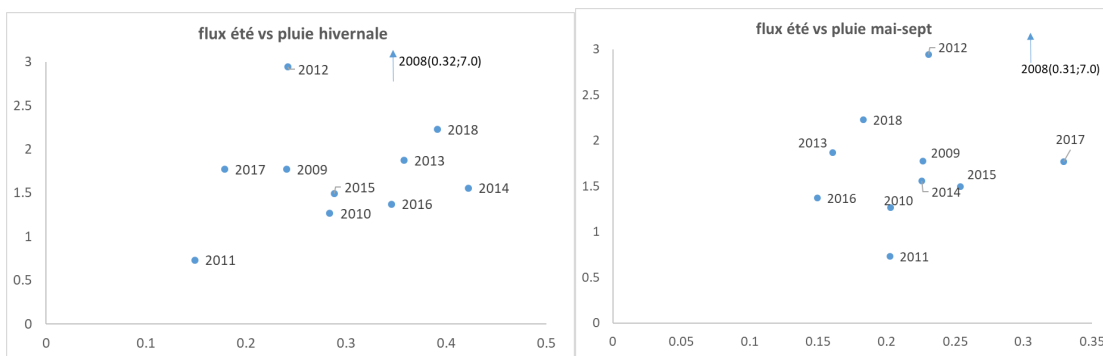


Figure 33 : relation entre flux d'azote estivaux (mai-septembre) et cumuls de pluie hivernaux et estivaux

D'autre part, on constate que l'efficacité du scénario sc30% est aussi sous la dépendance des pluies :

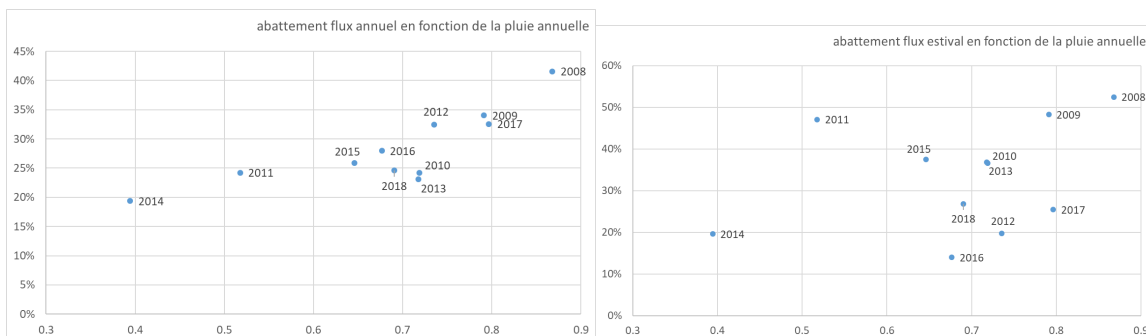


Figure 34 : relation entre l'abattement relatif (flux sc0-flux sc30)/flux sc0 et la lame d'eau annuelle.

Par conséquent, on a, là aussi, potentiellement, un effet antagonique, les années humides favorisant d'un côté une meilleure épuration et augmentant de l'autre le risque de marée verte.

Il semble donc que les effets du climat ne se cumulent généralement pas, ce qui permet d'espérer que la poursuite des efforts de réduction des flux tendra inévitablement à réduire l'occurrence des années de fortes marées vertes.

Rappelons pour finir que ces conclusions sont provisoires et devront être précisées par les résultats des études complémentaires en cours qui portent notamment sur l'amélioration de la simulation des biomasses et échouages dans la période juillet-septembre. De plus, un scénario complémentaire visant à simuler la séquence climatique analysée ici (2008-2018), mais avec les niveaux de concentrations des années 1995-2000 donnera une meilleure idée des progrès obtenus jusque là.

Références Bibliographiques

Beven, K. and Binley, A. (1992). The Future of Distributed Models - Model Calibration and Uncertainty Prediction, *Hydrological Processes* 6 : 279-298.

Beven, K. and Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology, *Journal of Hydrology* 249 : 11-29.

Chen, T. and Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System, : 785-794.

Efron, B. (1987). Better Bootstrap Confidence Intervals, *Journal of the American Statistical Association* 82 : 171-185.

Khu, S.-T. and Werner, M. G. (2003). Reduction of Monte-Carlo simulation runs for uncertainty estimation in hydrological modelling, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 7 : 680-692.

Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, *Technometrics* 33 : 161-174.

Mullen, K. M.; Ardia, D.; Gil, D. L.; Windover, D. and Cline, J. (2009). DEoptim: An R package for global optimization by differential evolution, .

Nash, J. and Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models; part I - a discussion of principles., *Journal of hydrology* 10 : 282-290.

Singh, S. K. and Bárdossy, A. (2012). Calibration of hydrological models on hydrologically unusual events, *Advances in Water Resources* 38 : 81 - 91.s

Squidant, H. (1994). MNTSURF: Logiciel de traitement des modèles numériques de terrain, ENSAR, Rennes, France : 36.