

PROJET MARS-TNT

Modélisation du développement des algues vertes en Baie de Saint-Brieuc
au moyen du modèle littoral EcoMARS3D-Ulves
couplé au modèle agro-hydrologique TNT2

Volet 1 : Modélisation TNT2
de l'impact de scénarios agricoles et climatiques
sur les flux d'azote en baie de Saint-Brieuc

Note de synthèse - Décembre 2021

François Oehler, SCHEME
Patrick Durand, INRAE

Note de synthèse rédigée avec l'appui de la MIRE et du Creseb

1. INTRODUCTION

Rappel des objectifs du couplage des 2 modèles

Le présent projet¹ 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, soit :

- simuler les concentrations et flux d'azote journaliers à l'exutoire des bassins versants selon différents scénarii agricoles testés, à l'aide du modèle TNT2 (agro-hydrologie des bassins versants) ;
- fournir ainsi au modèle EcoMars3D-Ulves (bio-physico-chimie du littoral et prolifération des ulves) des chroniques de concentration en nitrate les plus réalistes possibles, prenant en compte la dynamique saisonnière et le comportement spécifique de chaque bassin versant face à des scénarii agricoles crédibles.

Compte tenu des moyens conséquents qu'il faudrait mobiliser pour mener ce travail sur l'ensemble des baies à algues vertes, le choix a été fait de tester d'abord la faisabilité et l'intérêt de ce couplage de modèles sur un seul site, celui de la Baie de Saint-Brieuc.

L'objectif du projet n'est pas de définir des scénarii agricoles à appliquer mais de mettre au point la méthode globale et le couplage des deux modèles en testant des scénarios crédibles et possibles d'implémenter dans le modèle TNT2, pour générer des chroniques journalières de flux d'azote à l'exutoire appliqués au modèle EcoMarsUlves.

Rappel du travail concernant la modélisation TNT2 (volet 1)

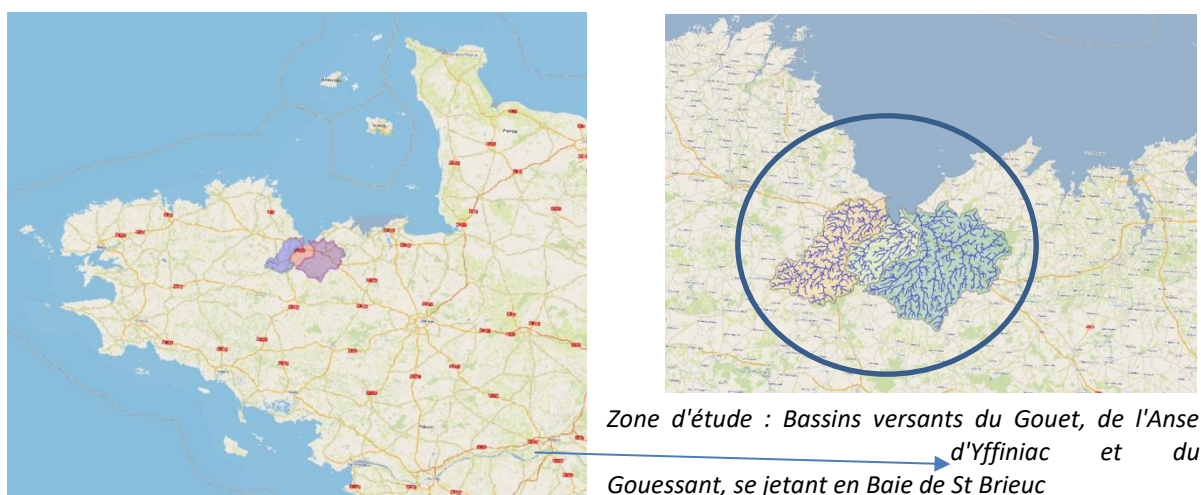
1. Actualiser les simulations de TNT2 sur les trois bassins-versants concernés de la baie de St Brieuc (Gouet, Gouessant, Anse d'Yffiniac).
2. Réaliser une série de scénarios permettant de répondre aux questions posées, et notamment en incluant des scénarios de diminution de flux nitriques et des projections climatiques futures.
3. Réaliser des simulations couplées entre TNT2 et Ecomars3D-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.

Cette note synthétise pour l'essentiel les résultats du point 2. Elle utilise néanmoins quelques éléments du point 3 à des fins d'interprétation plus larges, même si ce point 3 n'est pas finalisé. Un complément d'étude est en cours au CEVA pour mieux simuler les biomasses et les échouages sur la seconde moitié de la saison, qui sont jusqu'ici surestimés (résultats prévu pour 2022). Pour le point 1, on se reportera au rapport détaillé sur l'étude.

¹ Projet financé dans le cadre du Programme 162 des interventions territoriales de l'Etat (PITE), action 02 « Eau et Agriculture en Bretagne », axe 5 « Plan de lutte contre la prolifération des algues vertes ».

2. APPLICATION DES SCENARIOS AGRICOLES

Cette étude vise à tester trois scénarios de changements de pratiques agricoles et d'occupation du sol, sur les bassins versants de la baie de Saint-Brieuc : le Gouessant, le Gouet et le groupe « Anse d'Yffiniac ». Ces trois bassins sont, au niveau agricole, assez représentatifs des bassins versants bretons, avec une diversité allant de zones à forte dominante laitière et d'autres spécialisées en élevage hors sol. On y trouve aussi une assez forte diversité de pluviosité et de types de sols, même s'ils ne sauraient recouvrir à eux seuls l'ensemble des types de situations rencontrées en Bretagne. On peut donc considérer que les résultats présentés ici sont transférables aux autres bassins versants bretons, sinon dans les valeurs numériques, du moins dans leurs grandes tendances.



Le but de ces scénarios était les suivants :

- Objectif 1 : quantifier précisément le bénéfice obtenu sur les flux d'azote des améliorations de pratiques liées notamment à l'implémentation des réglementations depuis 30 ans (équilibre de la fertilisation, couverture hivernale, etc.).
- Objectif 2 : fournir, au modèle EcoMars3D-Ulves, des flux d'azote en sortie de bassin versant qui soient réalistes et « réglables », c'est-à-dire à un niveau de réduction fixé à l'avance.
- Objectif 3 : Estimer la réduction de fuites d'azote maximale qu'on puisse obtenir en maintenant autant que possible le niveau global de production agricole de la baie.

Les scénarios agricoles étudiés sont les suivants :

- Pour l'objectif 1 : scénario « Pratiques Agricoles Passées » (PAP) : si l'on avait gardé les pratiques agricoles de la fin des années 90, quelles fuites d'azote aurions-nous observées sur la décennie 2008-2018 ?
- Pour l'objectif 2 : scénario « Baisses de la Surface Cultivée » (BSC) : scénario de remplacement progressif des surfaces agricoles en rotation culturale par un couvert maximisant le piégeage d'azote, en partant des zones de bas de versant.
- Pour l'objectif 3 : scénario « Agriculture à Basses Fuites d'Azote » (BFN) : scénario de mise en œuvre de pratiques agricoles préservant la production globale tout en limitant au maximum les fuites d'azote.

Un 4^{ème} objectif est d'estimer l'impact possible du changement climatique sur les flux nitriques et l'efficacité de mesures de réduction des pertes nitriques. Les scénarios climatiques futurs « Aladin RCP 8.5 » avec ou sans réduction de fuites nitriques ont été étudiés (cf. chap.3).

Les surfaces simulées des trois bassins versants sont :

- Gouessant : 420 km² (52 % de la surface totale)
- Gouet : 256 km² (32 % de la surface totale)
- Anse d'Yffiniac : 130 km² (16 % de la surface totale)

Le comportement global des flux vers la baie de Saint-Brieuc est principalement influencé par le Gouessant et le Gouet.

2.1 Scénario « Pratiques Agricoles Passées » (PAP)

➤ Principe

Depuis 20 ans environ, les concentrations nitriques dans les 3 rivières ont fortement baissé, mais la variabilité des conditions climatiques fait que les conditions des années 1990 et des années 2010 ne sont pas facilement comparables. Le but de ce scénario est donc de rendre les choses plus comparables en supposant qu'aucun changement agricole n'ait eu lieu depuis 1990.

En perspective, quand le modèle Ecomars3D-Ulves sera définitivement calé, on pourra « rejouer » la séquence 2008-2018 avec ces flux pour quantifier le bénéfice obtenu sur l'occurrence des marées vertes, et vérifier l'hypothèse que la forte variabilité des échouages constatée ces dernières années (avec en particulier des années à faibles échouages) était bien due à cette réduction, et pas seulement aux conditions météorologiques.

Le scénario PAP a donc été construit en reprenant les pratiques agricoles passées (antérieures à 2005), appliquées à la période 2005-2018. Les principaux changements par rapport aux pratiques actuelles sont les suivants :

- pas de CIPAN,
- pas de contraintes sur les dates d'épandage,
- pression azotée d'environ 25 % plus élevée.

➤ Résultats

La figure 1 présente l'impact du scénario PAP sur l'ensemble des trois bassins versants, en le comparant au scénario de référence (niveau actuel simulé) : en l'absence d'évolution des pratiques agricoles, le quantile 90 annuel des concentrations en nitrate aurait été de ~80 mg.l⁻¹, contre moins de 35 mg.l⁻¹ actuellement.

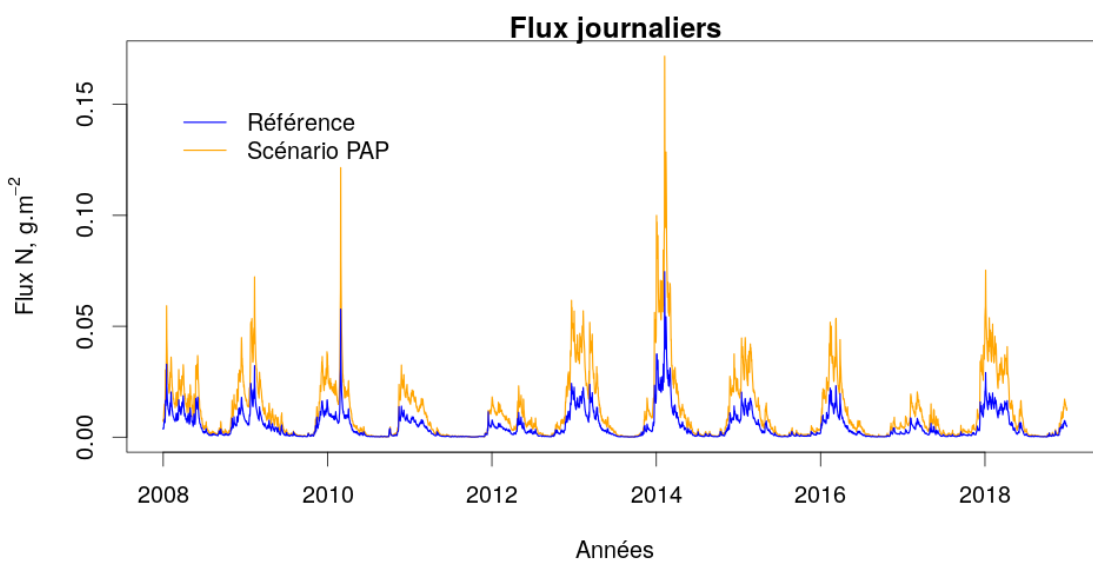
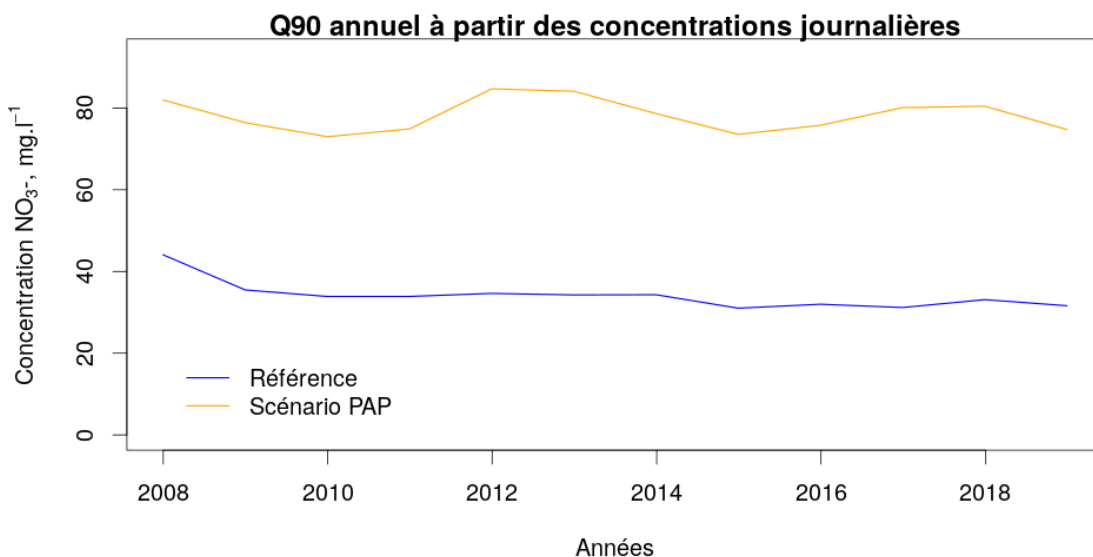
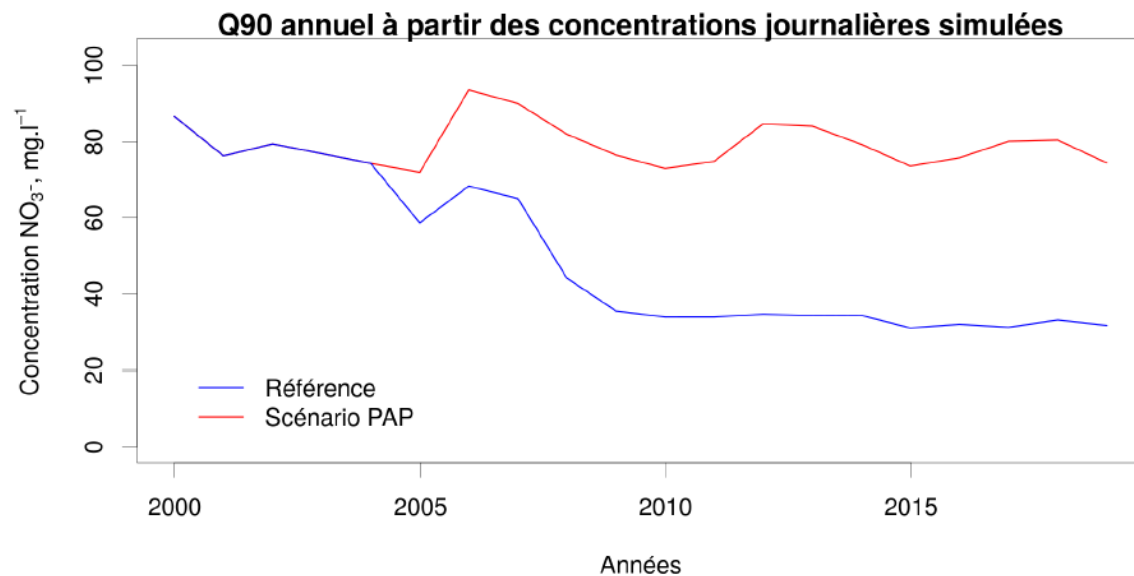


Figure 1 : Q90 et flux nitriques journaliers à la baie (données issues de la modélisation) pour le scénario PAP et la référence (niveau actuel simulé)

Le tableau 1 permet d'apprécier les impacts principaux sur le bilan azoté global. Outre les baisses de flux N à l'exutoire (ils auraient été de 38,67 kg/ha/an au lieu de 15,50 kg/ha/an actuellement) et d'intrants (fertilisation minérale et apports organiques), on constate un relatif maintien de la production agricole (exportations + pâturage), ce qui montre que les changements apportés ont amélioré l'efficacité de valorisation de l'azote apporté. Ces résultats montrent de façon spectaculaire **l'importance de ne pas se focaliser sur la seule baisse de fertilisation pour espérer des réductions de flux**. En effet, **les réductions obtenues sont bien supérieures aux baisses de pressions, notamment en raison d'une meilleure valorisation par les cultures**, liées aussi à l'ajustement des dates d'épandage des fertilisants organiques et la systématisation des CIPAN.

<i>Quantités, N kg.ha⁻¹ (surface totale)</i>	<i>Scénario Référence (pratiques actuelles)</i>	<i>Scénario PAP (pratiques passées d'avant 200, appliquées aux années 2005-2018)</i>
Principales entrées		
Fixation symbiotique	0,49	0,20
Fertilisation minérale	25,96	28,25
Apports organiques	53,50	63,46
Restitutions au pâturage	30,03	27,96
Variation de stock (Nappe et sol)	40,63	48,25
Principales sorties		
Dénitrification hétérotrophe	8,78	14,39
Volatilisation (NH ₃)	7,18	7,52
Exportations (fauches, récoltes)	85,74	76,89
Ingéré par les animaux (pâturage)	38,99	36,27
Flux à l'exutoire	15,50	38,67

Tableau 1 : Principaux éléments du bilan azoté, moyenne sur les 3 dernières années (équivalentes à 2016-2017-2018)

2.2 Scénario « Baisse de la Surface Cultivée » (BSC)

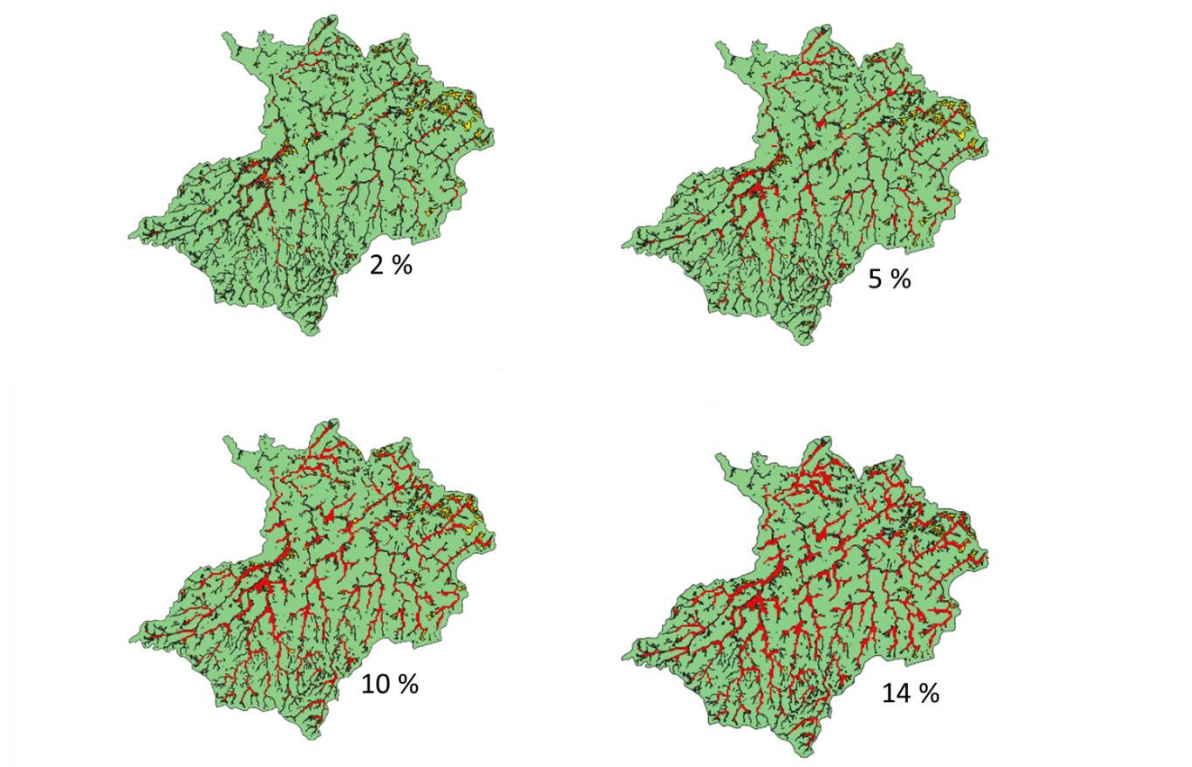
➤ Principe

Pour réduire les fuites d'azote, on peut soit modifier les pratiques agricoles sur une majorité de la SAU, soit transformer drastiquement une portion de celle-ci en surfaces peu ou pas fertilisées et avec une végétation pérenne. Le modèle TNT2 a été conçu pour simuler les échanges entre la nappe superficielle et les sols, qui sont en Bretagne très dépendants de la topographie et maximaux dans les zones de bas de versant près des cours d'eau. Ainsi, en transformant préférentiellement ces zones, on peut simuler l'interception par ces zones du nitrate venant de l'amont et circulant dans cette nappe superficielle. De nombreuses simulations antérieures ont montré que TNT2 prévoyait dans ce cas des diminutions de flux rapides et significatives. Le but de ce scénario est de « calibrer » ces prévisions, en augmentant progressivement la part de surface agricole convertie, en commençant par les zones les plus

souvent touchées par ces remontées de nappe. La conversion simulée est une transformation des surfaces agricoles en **prairies de fauche permanentes et non fertilisées**. Ce type d'utilisation du sol présente l'avantage d'être rapidement **capable de prélever des quantités importantes d'azote** et de **maintenir un certain prélèvement aussi longtemps que les conditions climatiques le permettent** en fin d'automne et début de printemps (contrairement à une zone boisée, qui met du temps à s'établir, restitue sous forme de litière la majorité de l'azote prélevé et ne prélève rien en l'absence de feuilles).

Dans le modèle TNT2, les transferts hydrologiques sont déterminés grâce à un indice topographique qui est le rapport entre la surface drainée (le « mini-bassin versant » de chaque point) et la pente : plus ce rapport est élevé, plus le point considéré est susceptible de recevoir davantage d'eau que ce qu'il peut évacuer, donc d'être souvent humide. C'est le même type d'indice qui est utilisé pour cartographier les zones humides potentielles. Nous avons donc utilisé cet indice pour prioriser les surfaces à convertir. Ainsi, jusqu'à environ 15 % de la surface des bassins versants, il s'agit essentiellement de zones humides ou potentiellement humides, puis on remonte progressivement dans les sols sains des versants.

La figure 2 montre, pour l'un des bassins versants, les surfaces correspondant à cette proportion croissante de surfaces concernées. Pour information, les zones humides réelles cartographiées par le SAGE occupent environ 14 % de la surface du bassin versant et leur localisation fine ne correspond pas exactement aux 14 % simulés ici (superposition d'environ 75 %).



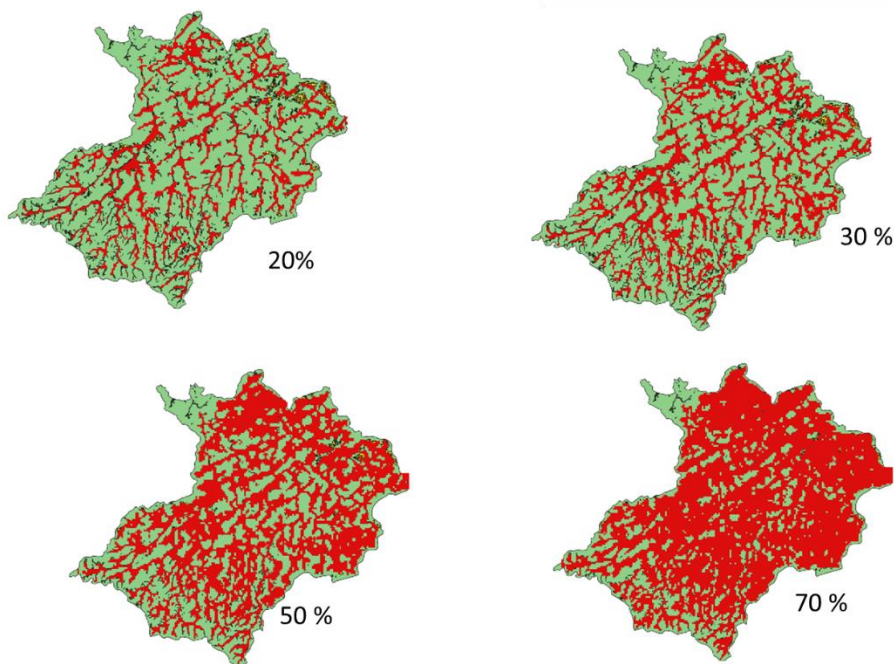


Figure 2 : Zones à indice d'humidité le plus élevé, avec des seuils de surface croissants (en rouge). En noir, zones humides cartographiées par le SAGE

Le principe de ce scénario est donc de délimiter les x % de surface ayant l'indice topographique le plus élevé (x variant de 0 à 100%), et de sélectionner dans cette surface toutes les parcelles cultivées ou avec des prairies exploitées. Toute cette surface agricole (donc, en pratique, tout ce qui n'est pas bois/forêt, jachère permanente ou zone urbaine) est **convertie en prairie fauchée non fertilisée non pâturée**. Précisons que toute parcelle, même partiellement dans l'emprise de la sélection, est entièrement convertie. Etant donné les hypothèses de travail, il n'est pas possible de relier directement ces surfaces converties dans le scénario à une situation réelle. Ce scénario est à utiliser comme un indicateur de l'ampleur des changements à apporter à l'agrosystème pour obtenir une baisse significative des flux d'azote à l'exutoire.

➤ Résultats

Les figures 3 et 4 présentent l'abattement moyenné sur 3 ans des flux d'azote à l'exutoire (annuels et estivaux) pour l'ensemble des trois bassins versants, en fonction du temps et pour différentes valeurs de surfaces modifiées en prairies fauchées, non pâturées et non fertilisées.

L'essentiel de l'abattement des flux est atteint en 5 ans environ. L'écartement entre les courbes montre que le gain d'efficacité est beaucoup plus fort pour les premiers % convertis (couleurs roses-fuchsias sur les figures) qu'au-delà de 20%. Ainsi, le scénario « 10 % de surface convertie » permet d'atteindre 30 % d'abattement en 10 ans environ, alors que le scénario 100 % de conversion atteint seulement 60 % d'abattement.

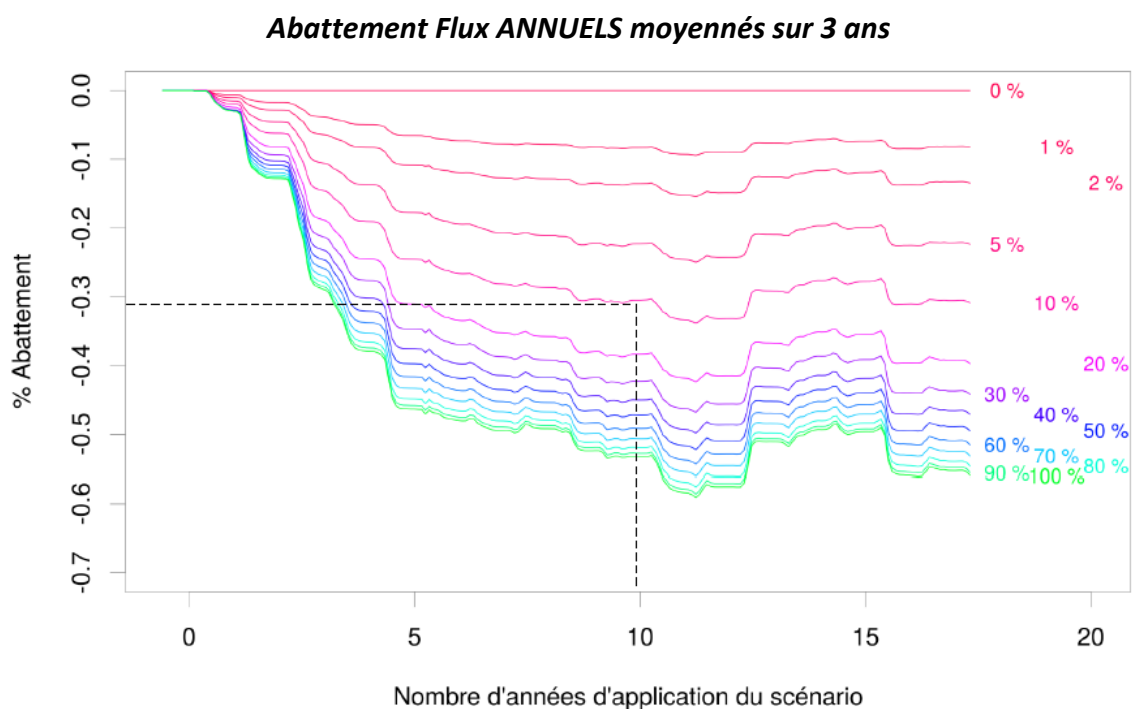


Figure 3 : Scénario BSC appliqué sur l'ensemble des trois bassins versants, Abattement ANNUEL du flux d'azote arrivant dans la baie, en fonction de la durée d'application du scénario, et ceci pour différentes valeurs de surface d'emprise du scénario représentées par les courbes de différentes couleurs (0 à 100 %). Pour l'échelle d'abattement, -0,3 correspond à un abattement de 30 % du flux de référence (flux actuel simulé) ou, autrement dit, le flux du scénario BSC correspond à 70 % du flux de référence. Ainsi, pour 10 % de surface d'emprise du scénario, on atteint 30 % d'abattement en 10 ans environ.

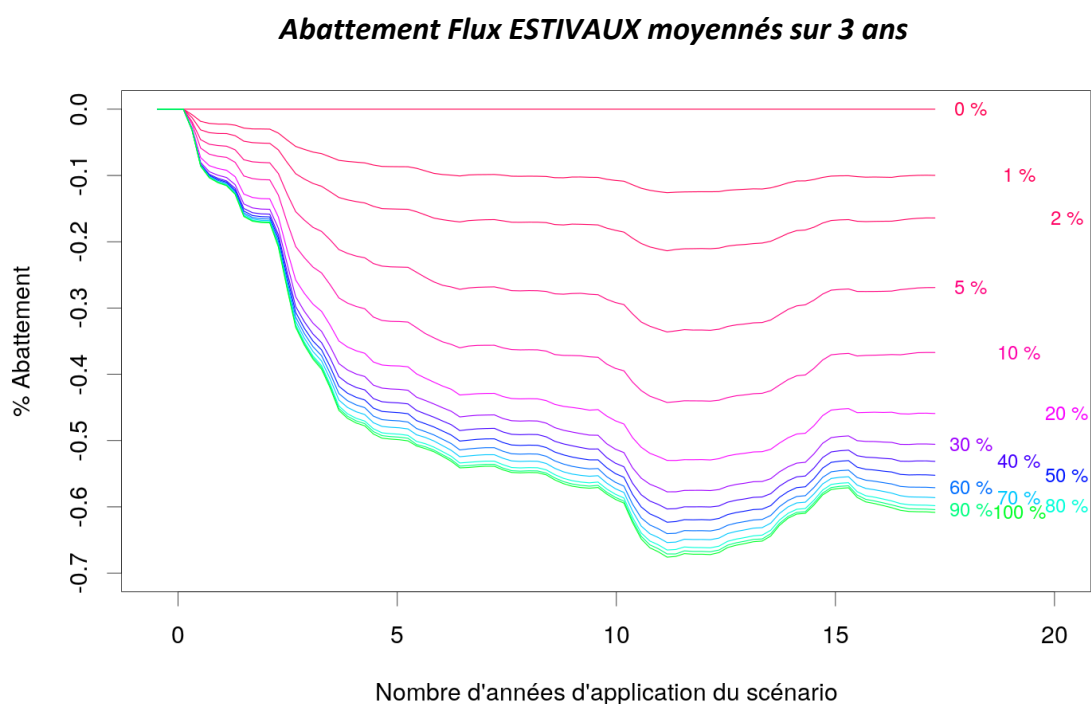


Figure 4 : Scénario BSC, ensemble des trois bassins versants : Abattement des flux ESTIVAUX en fonction de la durée d'application, pour plusieurs valeurs de surface d'emprise du scénario (0-100 %).

Cette meilleure efficacité des « premiers pourcents » s’explique ainsi : les surfaces converties en premier correspondent aux zones humides permanentes ou affectées temporairement par une remontée de la nappe souterraine, ce qui permet au couvert mis en place de capter une partie de l’azote transitant par cette nappe, et d’intercepter une partie des écoulements rapides venant de l’amont. Au-delà de ~25 % de surfaces converties, des zones peu actives (pas d’interactions sol-nappe) sont converties, amenant des gains réduits et avec un temps de réponse plus lent (zones éloignées du cours d’eau). Toute conversion supplémentaire continue à avoir un effet, car les apports agricoles diminuent en proportion, mais le gain supplémentaire par interception s’estompe.

L’efficacité est notablement plus faible pour l’un des trois bassins (pour reprendre l’exemple précédent, 10 % de conversion n’abat que 20 % des flux en 10 ans pour l’un des BV, contre 30 % pour les deux autres BV, qui eux réagissent de façon similaire). Ces variations sont dues au fait que chaque bassin versant a sa configuration propre et illustre le fait que **certains sites seront plus sensibles à certaines mesures que d’autres**. Dans le cas présent, c’est essentiellement parce que les parties les plus actives du bassin sont déjà peu cultivées ou en prairie que l’effet global est plus faible.

En conclusion sur ce scénario, on voit qu’il remplit bien son objectif de fournir une méthode permettant de simuler à la demande une réduction donnée de flux d’azote en sortie dans la baie, pouvant être utile au couplage avec Ecomars3D. **Il illustre bien aussi l’importance de la localisation des actions sur leur efficacité**, l’inverse étant aussi vrai, c’est-à-dire que **des pratiques très à risques dans les zones les plus actives hydrologiquement auront un impact négatif plus fort et plus direct sur les pertes**.

Enfin, il montre qu’il ne faut pas attendre de réduction spectaculaire des flux d’une action limitée à une faible surface de bassin versant, et ce d’autant moins si elle n’est pas ciblée sur les fonds de vallée : c’est ce qu’illustrent notamment les courbes très proches en bleu et vert sur les figures 3 et 4.

Au-delà de ces conclusions, il faut se montrer très prudent pour transposer ces résultats dans la réalité, pour deux raisons principales. D’une part, la localisation des zones à convertir est faite sur des mailles de 150m x 150m, donc très grossière, et sur la base d’une théorie simplifiée (prédiction par indice topographique). D’autre part, et surtout si le modèle est basé sur une description réaliste des processus, ce type de conversion n’a cependant jamais été testé dans la réalité, et donc les prévisions simulées ne sont pas validées. Par conséquent, ces simulations ne sauraient être utilisées telles quelles pour localiser et dimensionner des actions. En tenant compte des limites sus-mentionnées, elles prennent en revanche tout leur sens s’il s’agit d’inspirer et orienter des choix de stratégie d’action locale.

2.3 Scénario « Basses Fuites d’azote » (BFN)

➤ Principe

L’esprit de ce scénario est de remplacer les pratiques occasionnant les risques de fuites d’azote les plus forts par des **pratiques réputées les plus efficaces pour limiter les fuites d’azote** dans les systèmes de polyculture élevage bretons **en essayant de maintenir la production globale proche de son niveau actuel**. L’objectif est donc de combiner et systématiser les préconisations les plus exigeantes d’adaptation des systèmes agricoles actuels pour limiter les fuites d’azote.

Les principes du scénario sont les suivants :

- Remplacer autant que possible les engrais de synthèse par les effluents d’élevage, afin de limiter la pression azotée sans réduire trop fortement les cheptels.
- Éliminer les rotations « à risque fort de lessivage », notamment maïs-ensilage-céréales d’hiver-prairie temporaire : remplacer par des prairies permanentes RGA-Trèfle blanc, fertilisées au fumier de bovins composté, fauchées et pâturées.
- Systématiser les couverts automnaux/hivernaux, notamment par le semis de RGI sous couvert dans le maïs grain et en remplaçant les céréales d’hiver par des céréales de printemps précédées d’une CIPAN.

D’un point de vue « système de production », la conséquence pourrait être de transformer les exploitations ayant des bovins en systèmes herbagers spécialisés bovins et d’éliminer les systèmes mixtes bovins/granivores. Il suppose aussi des échanges parfaitement organisés d’effluents entre les trois bassins versants. Le scénario est appliqué sur la période 2018-2036, comme pour le scénario BSC.

➤ Résultats

La figure 5 synthétise les effets de l’application du scénario, et permet une comparaison avec le scénario précédent « baisse des surfaces agricoles » (BSC). Le scénario BFN a un impact similaire au scénario BSC convertissant 6% des zones sur l’ensemble des trois bassins versants, mais avec de fortes disparités entre bassins versants. Notamment, dans le bassin pour lequel le scénario BSC était le moins efficace, le scénario BFN y est plus efficace, produisant un abattement plus important que le BSC avec 10 % de surface convertie.

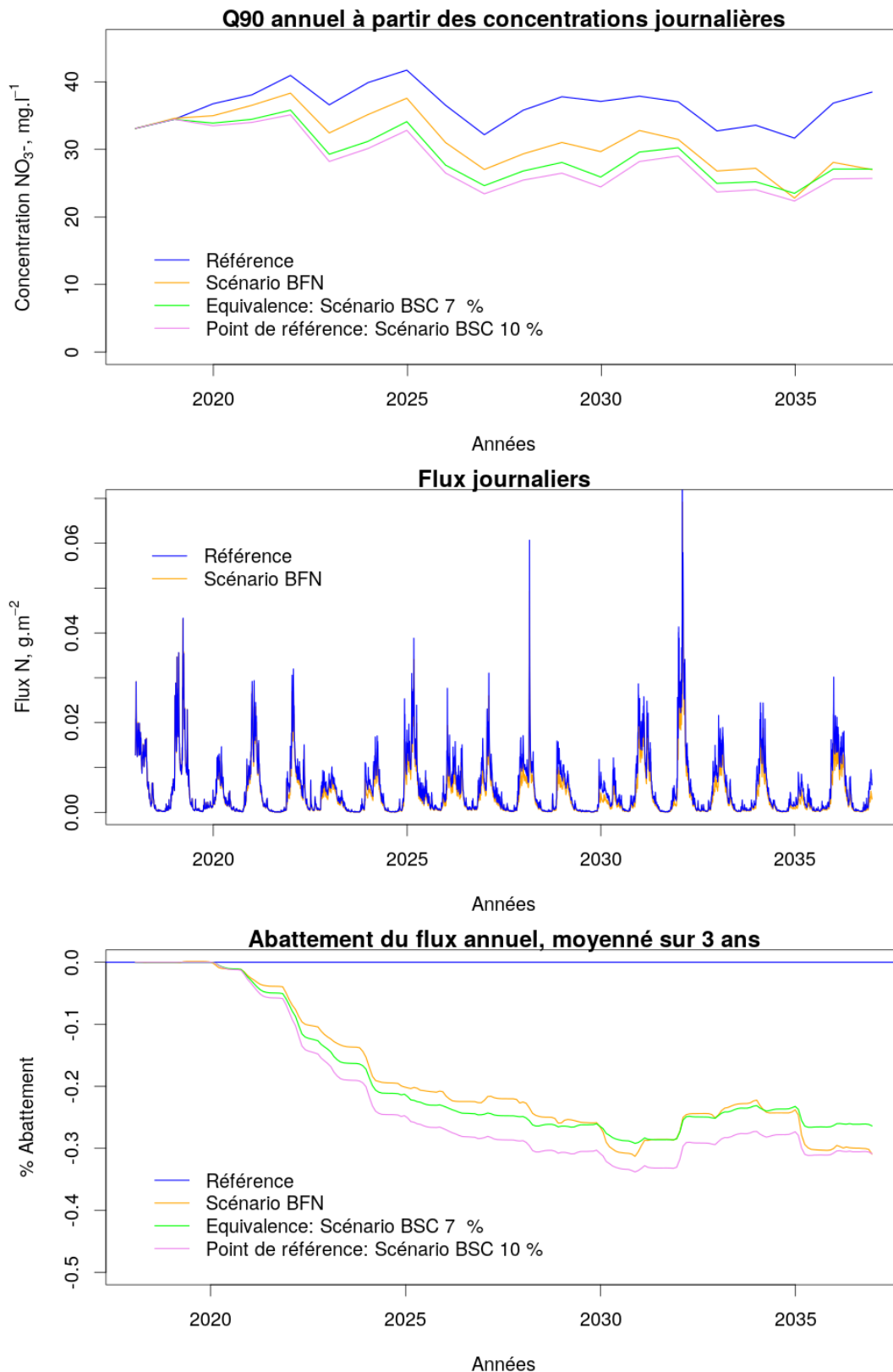


Figure 5 : Illustrations du scénario BFN et comparaison avec le scénario BSC. En haut, évolution du Q90 moyen des rivières pour la Référence (pas de changement par rapport à 2018), le scénario BFN, le scénario BSC 10 % et le scénario BSC 7 %. On voit, comme sur le graphique du bas représentant la réduction des flux annuels, que les scénarios BSC agissent plus rapidement, et qu'après une dizaine d'années d'application, les scénarios BSC 7 % et BFN ont sensiblement le même effet. Le graphique du milieu montre les variations journalières des flux d'azote, très dépendants des débits.

L'effet du scénario BFN est plus lent à s'exprimer que le scénario BSC, et il écrête moins les concentrations maximales (quantiles 90). Le modèle semble donc montrer qu'un changement radical ciblé sur les zones basses des bassins versants (zones les plus proches des cours d'eau) serait plus efficace qu'une modification certes forte des pratiques sur l'ensemble de la surface sans remise en cause majeure de la productivité globale.

Si l'on examine dans le détail les changements agronomiques induits par le scénario BFN, on constate qu'il se traduit par un **maintien de la pression azotée totale sur la baie, mais avec des redistributions radicales à la fois entre les types d'apports et dans l'espace**. Ainsi, une grande partie de l'azote bovin dit « maitrisable » est transformé en rejets au pâturage, les apports de lisier de porc diminuent fortement sur les deux bassins à orientation plus laitières mais augmentent sur le bassin le plus granivore, du fait de la substitution de l'azote minéral par de l'azote organique et de la réduction des lisiers de bovins. Enfin, le scénario suppose aussi une forte diminution des apports de fientes de volailles. **Cet exercice met en exergue l'importance de raisonner sur les systèmes et les pratiques générant des fuites d'azote plutôt que simplement sur les pressions azotées totales.**

2.4 Scénario croisé « Baisse de la Surface Cultivée » et « Basses Fuites d'azote » (BSC x BFN)

➤ Principe

L'objectif de ce scénario est de tester le niveau d'indépendance ou de synergie/antagonisme des deux mesures appliquées ensemble. En effet, l'efficacité de BSC dépend notamment du niveau de pression azoté, plus faible pour BFN : quel niveau d'efficacité garde un scénario de baisse de la surface cultivée (BSC) appliqué sur un système à basse fuite d'azote (BFN) ?

➤ Résultats

Les figures 6 et 7 présentent l'abattement moyenné sur 3 ans des flux d'azote à l'exutoire (annuels et estivaux) pour l'ensemble des trois bassins versants, en fonction du temps et pour différents scénarios BSC, BFN et BSC x BFN. L'effet de BSC est plus fort et plus rapide que l'effet de BFN sur la période estivale. Bien que les effets cumulés de BSC et BFN soient inférieurs à la simple somme des deux effets séparés, l'effet cumulé reste potentiellement très important et il est plus marqué sur les flux estivaux. Cela montre un certain niveau d'indépendance des deux grands types de modifications pour des valeurs de BSC < 15 %, et l'intérêt d'utiliser ces deux scénarios prospectifs comme cadrage large suivant deux axes : d'un côté, la diminution radicale et systématique de la pression azotée ciblée dans l'espace (BSC) et de l'autre, la modification globale des systèmes et pratiques agricoles (BFN). Rappelons que l'efficacité respective dépend des spécificités du bassin versant étudié.

Il faut toutefois rappeler que ces deux scénarios restent très théoriques et simulés de façon schématique (application totale et immédiate sur la totalité de la surface concernée). **Ces résultats doivent donc plutôt être interprétés comme une justification des stratégies visant à prioriser les actions sur les zones les plus critiques pour le transfert et celles encourageant des transformations radicales des systèmes et des pratiques.**

Abattement flux ANNUELS moyenné sur 3 ans

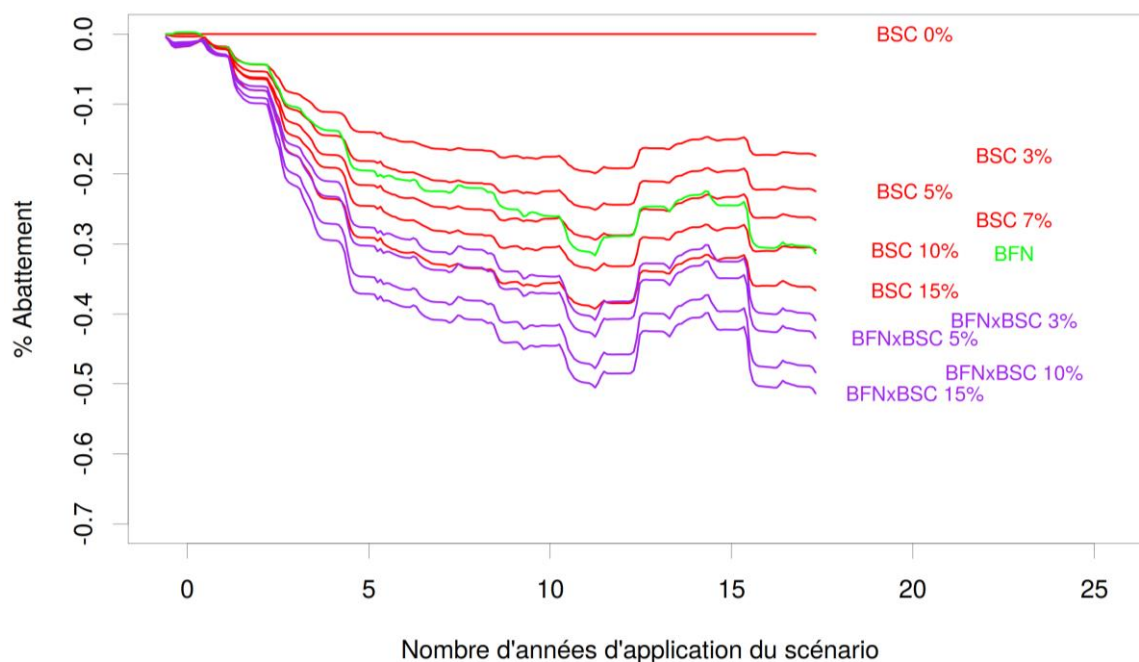


Figure 6: Scénario croisé BSCxBFN. Ensemble des trois bassins versants. Abattement des flux ANNUELS en fonction de la durée d'application, pour plusieurs valeurs de surface d'emprise du scénario (en violet), ainsi que des résultats du scénario BSC et BFN (en rouge et en vert).

Abattement flux ESTIVAUX moyenné sur 3 ans

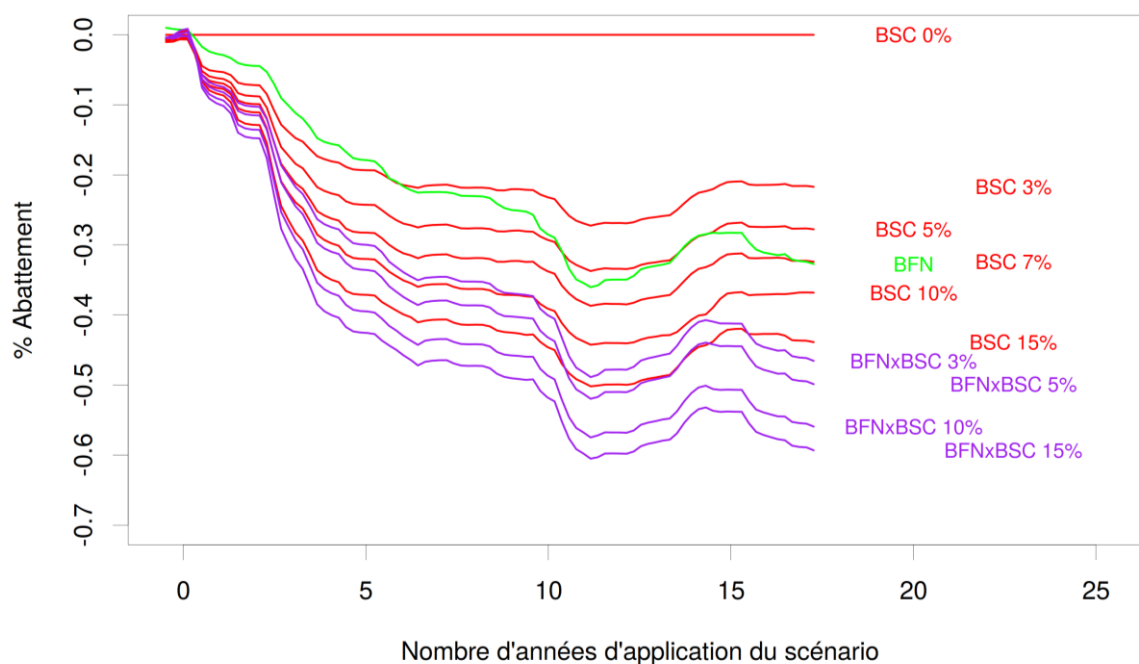


Figure 7: Scénario croisé BSC x BFN. Ensemble des trois bassins versants. Abattement des flux ESTIVAUX en fonction de la durée d'application, pour plusieurs valeurs de surface d'emprise du scénario, ainsi que des résultats du scénario BSC et BFN.

3. APPLICATION DE SCENARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

3.1 Méthode

Pour estimer les effets directs possibles du changement climatique à venir sur les fuites d'azote et le phénomène des marées vertes, nous avons utilisé les projections climatiques issues du projet ALADIN de Météo France, qui fournit des résultats à une résolution fine (12 km²) sur l'ensemble de la France. Comme les autres types de projections climatiques, ces scénarios se basent sur différentes hypothèses d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre (GES). Afin de maximiser les effets simulés, nous avons choisi le scénario d'émission de GES le plus pessimiste, dit « RCP 8.5 ». Cependant, nous nous sommes fixé un horizon temporel relativement proche (2030-2060) car il nous paraît peu utile de raisonner à plus long terme compte tenu de l'ampleur possible d'autres changements (agricoles, démographiques, sociétaux...) non simulés ici. Ces projections climatiques ont été appliquées avec l'hypothèse de pratiques agricoles constantes au niveau actuel (référence) et avec le scénario BSC 10 % pour estimer si le changement climatique agirait de façon différenciée sur un type de scénario d'abatement.

3.2 Résultats

Nous avons dans un premier temps examiné les évolutions de différents indicateurs climatiques importants pour les marées vertes projetées par Aladin. Le constat est que, mis à part les températures qui augmentent nettement (+1°C sur les températures maximales annuelles, +0,5°C pour les températures de l'eau de mer en printemps-été), les autres indicateurs n'évoluent que peu, et souvent pas de manière significative : légère baisse des précipitations sur mai-juin-juillet, légère augmentation des précipitations hivernales, pas d'évolution nette sur la fréquence des tempêtes ou le rayonnement global au printemps. Par contre, les projections montrent une tendance à l'augmentation de la variabilité interannuelle, donc prévoit des situations très contrastées d'une année sur l'autre, en cohérence avec la perception intuitive de ces dernières années. En conséquence, l'application de ces projections aux scénarios simulés par TNT2 ne montre aucune tendance suffisamment affirmée, si ce n'est la répercussion de l'augmentation de la variabilité interannuelle.

La conclusion est donc que les effets directs des changements climatiques ne semblent pas suivre une tendance nette, mais très probablement une augmentation de l'incertitude et des situations atypiques. Il est donc plus probable que ce sont les effets indirects des changements globaux dans leur ensemble (sur l'agriculture, la démographie, l'économie régionale, etc.) qui auront les impacts les plus forts sur l'évolution des marées vertes dans un futur proche, mais cela dépasse le cadre de cette étude.

4. IMPACTS POTENTIELS SUR LES MAREES VERTES

Comme indiqué en introduction, l'état actuel des simulations des blooms algaux ne nous permet pas de tirer des conclusions précises sur l'impact de ces scénarios sur les marées vertes (travaux de modélisation en cours du CEVA, résultats attendus début 2022). Cependant, les résultats préliminaires nous apportent des informations suffisamment fiables pour avancer dans la compréhension du contrôle des marées vertes par les flux nitriques.

La figure 8 montre que l'intensité de la marée verte d'une année donnée est liée au flux d'azote estival, mais que cette relation montre une certaine dispersion autour de la tendance.

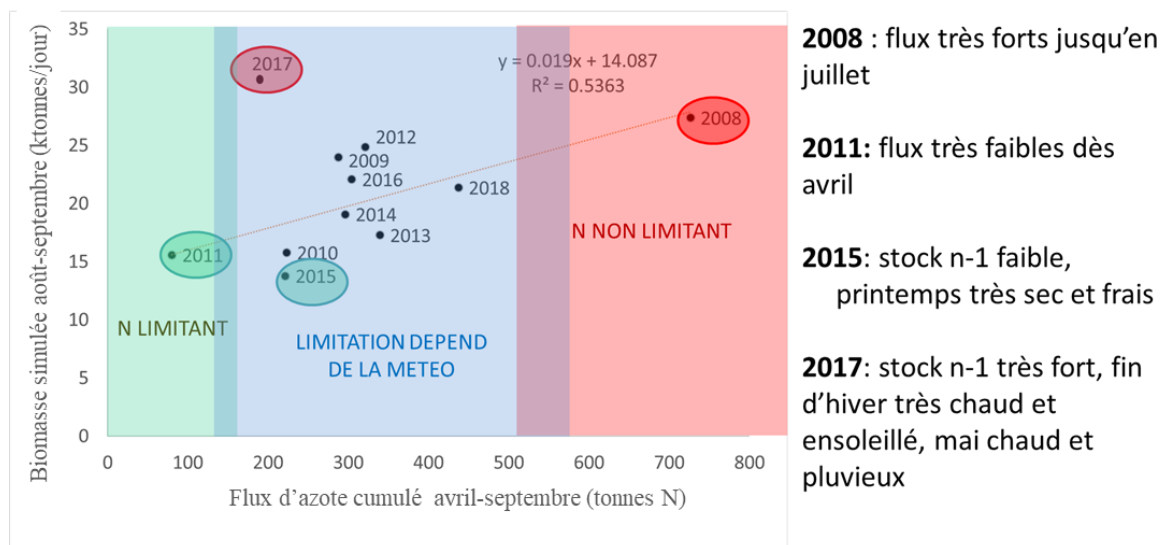


Figure 8 - Relation entre flux d'azote estivaux (tonnes N) et biomasse d'algues (kt/j), simulés sur la période 2008-2018.

On peut expliquer cela grâce à l'estimation de la limitation de la croissance par l'azote par EcoMars3D-Ulves.

Quand le flux d'azote est très élevé (années très humides ou concentrations très fortes), **l'azote n'est jamais limitant** : c'est le cas de l'année 2008, et probablement de la plupart des années des décennies 1980-90, quand les concentrations étaient très élevées.

En 2010-2011, on voit apparaître **des années avec des petites marées vertes, du fait d'une forte et précoce limitation par l'azote** (concentrations plus faibles et conditions sèches).

Entre les deux, on observe **de nombreuses années intermédiaires où la limitation par l'azote peut intervenir ou non, suivant les conditions climatiques**. Ainsi, en 2015, un hiver tourmenté suivi d'un printemps froid et nuageux a fortement retardé le début de croissance, et l'été a été suffisamment sec pour que la limitation par l'azote prenne rapidement le relais, d'où une faible marée verte. A l'opposé, en 2017, une croissance très précoce favorisée par un fort

stock résiduel en début d'année et un printemps chaud et ensoleillé, a pu se poursuivre longtemps du fait de fortes pluies en juin retardant la limitation par l'azote.

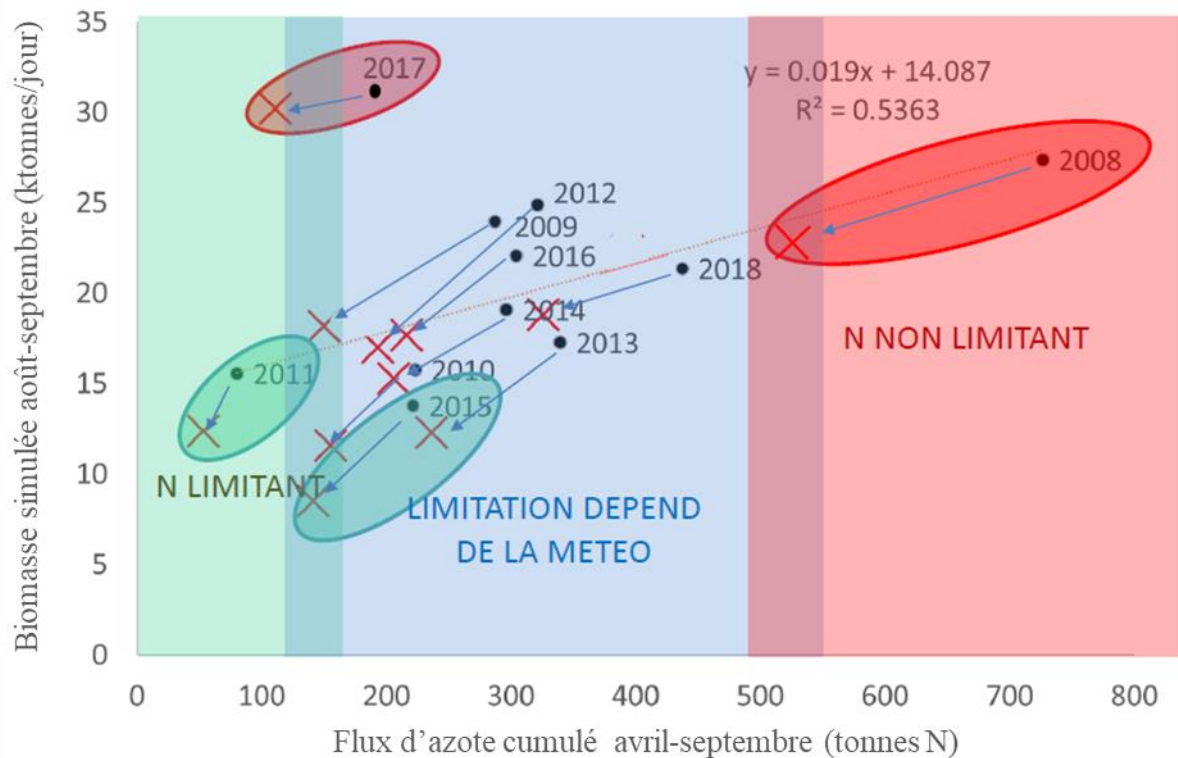


Figure 9 : Relation entre flux d'azote estivaux (tonnes N) et biomasse d'algues (kt/j), simulés sur la période 2008-2018 (points bleus) et pour le scénario BSC 10 % (croix rouges). Les flèches montrent le déplacement pour une même année climatique, entre le scénario de Référence et le scénario BSC 10 %.

Si l'on reporte sur le même graphique les simulations avec les flux du scénario BSC 10 % (figure 9), on peut comprendre pourquoi une réduction de flux d'azote peut avoir des conséquences très différentes suivant l'année considérée. Ainsi, en 2008, malgré une forte réduction du flux (de plus de 250 tonnes), la marée verte simulée reste forte car on est toujours dans le domaine des conditions non limitantes en azote. A l'inverse pour 2015 ou 2011, une faible diminution en absolu des flux (50-100 tonnes) produit une forte réduction de biomasse algale, car les conditions initialement défavorables à la croissance s'intensifient encore. Pour une réduction de flux similaire, l'année 2017 ne voit pas de diminution significative de croissance des algues, car la croissance très précoce s'effectue avant que les débits ne baissent suffisamment pour limiter l'apport d'azote.

5. PRINCIPALES CONCLUSIONS

Les résultats du **scénario PAP (pratique agricoles passées)** illustrent l'ampleur et l'intérêt des efforts réalisés jusque-là par les agriculteurs et les structures chargées d'implémenter la réglementation et d'accompagner les actions de remédiation. Ce sont notamment le raisonnement de la fertilisation (dates et doses) et l'introduction des CIPAN qui ont permis les progrès constatés. Les baisses obtenues ici par modélisation sont plus spectaculaires que les baisses réellement observées, car la situation actuelle est comparée avec une situation fictive où les pratiques passées auraient perduré 20 ans, entraînant une dégradation plus accentuée. Pour ce scénario, le couplage avec EcoMars3D-Ulves n'apporterait que peu d'information supplémentaire, car les niveaux de flux simulés sont suffisants pour que, chaque année ou presque, des marées vertes de grande ampleur se soient développées dans la baie.

Comme attendu et déjà montré sur d'autres bassins versants bretons, **le scénario BSC (baisse de la surface cultivée) est très efficace**, notamment **quand la conversion en prairies non fertilisées concerne les zones de bas de versant couvrant environ 10-15% de la surface totale du bassin versant**. Au-delà d'environ 20 % de surfaces ainsi modifiées, les retraits supplémentaires de surface cultivée apportent des gains moins rapides, car la possibilité d'interception des nitrates venant du haut de versant disparaît, l'eau souterraine transitant sous la base du sol. Ce scénario ne doit toutefois pas être assimilé aux restaurations de zones humides effectuées ou voulues dans les projets PLAV, car, dans la modélisation, son efficacité est liée au caractère systématique et intégral de l'abandon des cultures et du pâturage dans les bas de versant. Il permet surtout de montrer quelle pourrait être la dynamique la plus rapide possible de baisses de flux à l'exutoire, et l'ampleur des transformations à envisager pour l'atteindre.

Le scénario BFN (basse fuite d'azote) montre qu'il serait en théorie possible d'obtenir des baisses significatives de flux **en maintenant un niveau de production agricole assez comparable à l'actuel, mais en supposant la transformation de l'intégralité des systèmes bovins en systèmes herbagers sans maïs ensilage** (donc une répartition idéale des parcellaires et une bonne gestion des prairies) ainsi qu'une gestion idéale des effluents et l'abandon des céréales d'hiver au profit de céréales de printemps. De ce fait, on éliminerait la plupart des situations les plus à risques de fuite d'azote. La substitution d'une large part des engrais minéraux par les effluents et la diminution de l'azote bovin à épandre (du fait de l'extension du pâturage) permettrait de garder des surfaces suffisantes pour l'épandage du lisier de porc. Il s'agit donc d'une modification en profondeur des systèmes actuels qui ne prétend pas être réaliste ni complètement cohérente d'un point de vue agronomique ni socio-économique.

Même si l'effet est moindre qu'une simple addition, **Le croisement des scénarios BSCxBFN** pourrait mener à les **baisses de flux potentiellement très importantes**, notamment sur la période estivale. Le potentiel d'efficacité de BSC appliqué à BFN reste élevé, montrant que les deux axes prospectifs proposés à travers ces scénarios très contrastés sont **relativement indépendants et non-exclusifs**, surtout **pour un objectif de baisse rapide et significative** des flux d'azote vers la baie.

Les scénarios climatiques testés semblent permettre de conclure à une absence d'effet direct significatif du changement climatique sur les marées vertes à moyen terme, sinon par une augmentation de l'incertitude et du contraste entre les années. Il est probable qu'à cet horizon (2030-2060), des changements bien plus profonds seront intervenus dans la région, sur le plan agricole et plus largement socio-économique, et qu'ils auront des impacts bien plus importants sur les marées vertes.

Il reste maintenant à compléter ces études par le couplage avec Ecomars3D-Ulves (travaux du CEVA en cours de finalisation pour début 2022) pour déterminer l'impact exact de ces changements simulés sur les marées vertes, et pouvoir préciser les baisses de flux nécessaires à l'atteinte des objectifs de qualité du littoral.

Les premiers tests permettent cependant de tirer des conclusions et soulever des pistes intéressantes :

- Les baisses de flux constatées depuis les années 2000 ont permis de passer d'un régime où l'azote n'était jamais limitant, et donc les marées vertes présentes chaque année à un niveau important, à un **régime plus variable où la limitation d'azote peut s'exprimer certaines années et réduire fortement le phénomène.**
- **Il faudra des réductions de flux supplémentaires significatives pour limiter les marées vertes** les années où les conditions climatiques seront très favorables au maintien des stocks hivernaux et au démarrage printanier précoce.
- Pour avoir l'assurance de ne plus connaître ces années de très fortes proliférations, on peut faire l'hypothèse qu'**il faut franchir un palier supplémentaire**, pour passer à un régime où les stocks automnaux d'algues seront suffisamment faibles pour empêcher toute reprise précoce, ou bien intervenir pour éliminer ces stocks automnaux ou les stocks de fin hiver. Les simulations couplées à venir devraient nous permettre de préciser les conditions de mise en place de ce nouveau régime.

Ces résultats obtenus dans le cas particulier de la Baie de St-Brieuc ont un caractère générique en ce qui concerne les grandes tendances et les conclusions principales. Toutefois, les valeurs absolues d'efficacité des scénarios et de temps de réactions ne sont pas généralisables, et nécessiteraient d'être déterminées au cas par cas pour les différents bassins-versants des baies à marées vertes, tout comme les impacts sur les marées vertes de chaque baie.