

PROJET MARS-TNT

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



Rapport de synthèse - 2023

François Oehler (SCHEME) et Patrick Durand (INRAE)
Pierre-Emmanuel Oms, Sylvain Ballu et Sophie Richier (CEVA)

Avec l'appui du  Creseb et de la MIRE

Table des matières

1. Introduction	2
2. Application de scénarios agricoles	3
2.1 Scénario « Pratiques Agricoles Passées » (PAP)	4
2.2 Scénario « Baisse de la Surface Cultivée » (BSC).....	7
2.3 Scénario « Basses Fuites d’azote N » (BFN).....	12
2.4 Scénario « Baisse de la Surface Cultivée » et « Basses Fuites d’Azote » (BSC x BFN)	15
2.5 Scénario « 100% abattement »	18
3. Impacts potentiels sur les marées vertes selon les années	19
4. Application de scénarios de changement climatique	21
3.1 Méthode.....	21
3.2 Résultats.....	21
5. Principales conclusions	22

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 Eco-MARS3D-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 Eco-MARS3D-Ulves.

Rappel du travail concernant la modélisation

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 Eco-MARS3D-Ulves afin de mieux simuler les phénomènes actuels et identifier les situations limitantes en azote en fonction des années climatiques et du niveau moyen de concentration/flux nitrique.

Ainsi, les scénarios de flux d'azote des différents bassins versants de la baie, modélisés dans TNT2 par INRAE--SCHEME, ont été appliqués en données d'entrée du modèle Eco-MARS3D-Ulves par le CEVA, pour la période 2026-2036 avec les conditions hydro-climatiques des années 2008-2018

Ce rapport synthétise l'essentiel des résultats de cette étude de modélisation couplée, menée sur la Baie de St Brieuc.

NB : A l'occasion de ce travail, Inrae-Scheme et le Ceva ont testé et apporté plusieurs améliorations à leur modèle respectif (cf. rapports finaux détaillés)

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 DE SCENARIOS AGRICOLES

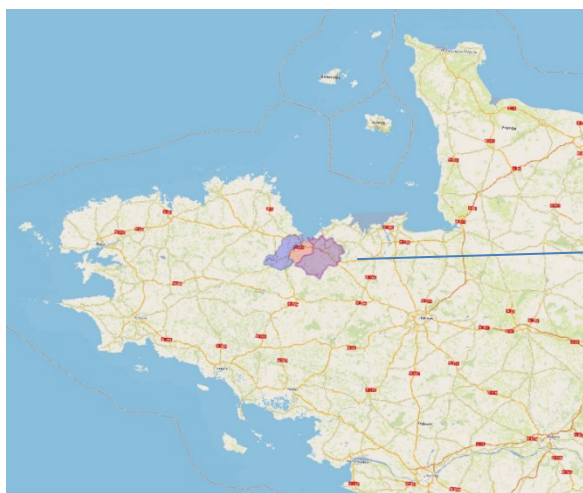
Cette étude vise à tester trois scénarios de changements de pratiques agricoles et d'occupation du sol, sur les bassins versants de la baie de Saint-Brieuc : le Gouessant, le Gouet et le groupe « Anse d'Yffiniac ».

Ces trois bassins sont, au niveau agricole, assez représentatifs des bassins versants bretons, avec une diversité allant de zones à forte dominante laitière à d'autres spécialisées en élevage hors sol. On y trouve aussi une assez forte diversité de pluviométrie 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 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.

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.



Zone d'étude : Bassins versants du Gouet, de l'Anse d'Yffiniac et du Gouessant, se jetant en Baie de St Brieuc

Le but des scénarios appliqués 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 Eco-MARS3D-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 les plus pessimistes du GIEC « Aladin RCP 8.5 » avec ou sans réduction de fuites nitriques ont été étudiés dans TNT2. Le CEVA a complété le scénario en prenant en compte l'augmentation des températures de l'eau dans la baie de Saint-Brieuc pour la décennie 2026-2036 par rapport à la décennie 2008-2018.

L'ensemble des scénarios présentés ci-dessus sont **comparés relativement à un scénario dit de « référence » qui correspond au niveau actuel simulé, c'est-à-dire à l'ensemble des flux de nitrate journaliers modélisés par le modèle TNT2 pour la période 2008 - 2018**. Ce scénario de référence vise à améliorer la chronique des flux de nitrate relativement à un calcul par une simple interpolation linéaire des mesures (bi)mensuelles de concentrations en NO₃ sur le Gouët, l'Urne et le Gouessant.

2.1 Scénario « Pratiques Agricoles Passées » (PAP)

2.1.1 - 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.

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 cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN),
- pas de contrainte sur les dates d'épandage,
- pression azotée d'environ 25 % plus élevée.

2.1.2 – Résultats TNT2 (azote nitrique à l'exutoire des BV)

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 $\sim 80 \text{ mg.l}^{-1}$, contre moins de 35 mg.l^{-1} actuellement.

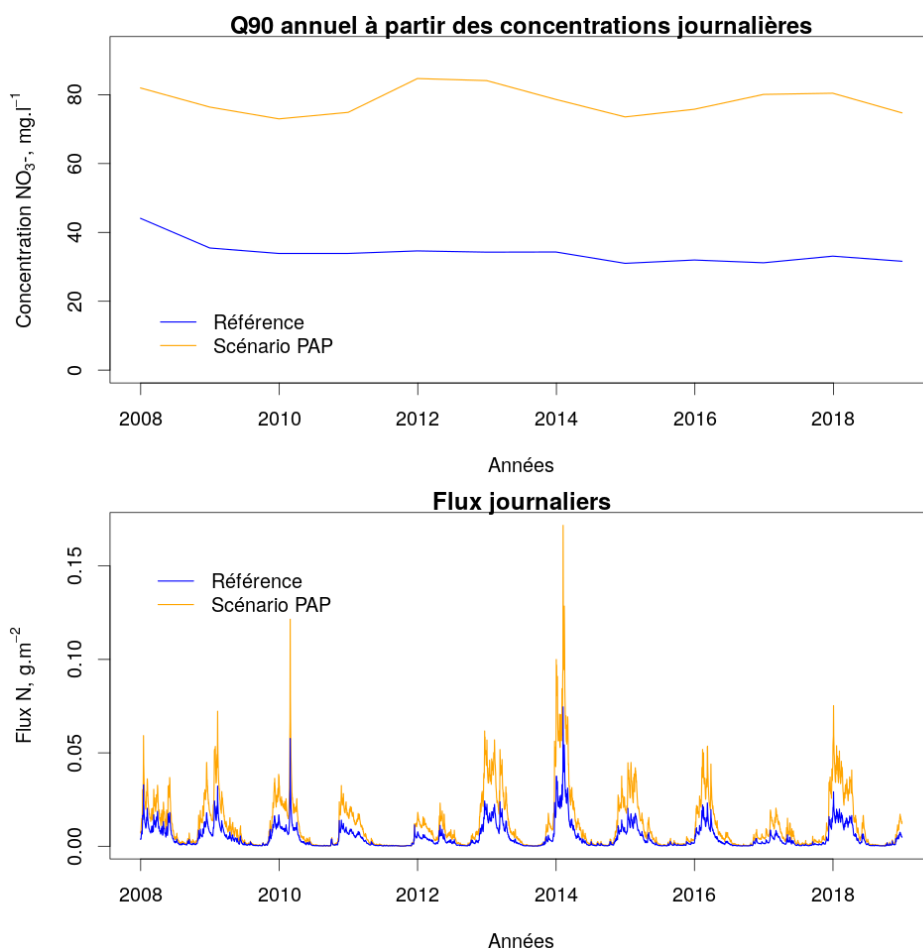


Figure 1 : Q90 et flux nitriques journaliers à la baie (données issues de la modélisation) pour le scénario PAP et la référence (niveau actuel simulé)

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 $38,67 \text{ kg/ha/an}$ au lieu de $15,50 \text{ kg/ha/an}$ 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.

Quantités, N kg.ha ⁻¹ (surface totale)	Scénario Référence (pratiques actuelles)	Scénario PAP (pratiques passées d'avant 2000, appliquées aux années 2005-2018)
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 2016-17-18)

2.1.3 – Résultats Eco-MARS3D-Ulves (surface d'échouage d'ulves dans la baie)

Le scénario PAP montre que les flux de nitrate du printemps/été (mai – septembre) auraient été en moyenne de + 137% par rapport au scénario de référence. Les surfaces en ulves sur la période août - septembre auraient été plus importantes, de + 23% en moyenne.

Ainsi, la baisse des flux nitriques a permis d'augmenter l'occurrence d'années à « faible » prolifération : 8 années sur 11 avec moins de 220 ha de surface d'échouage d'ulves en août-sept. contre 2 années seulement si les pratiques n'avaient pas évolué (cf. figure 2). Le scénario PAP permet de montrer qu'en l'absence d'actions, les proliférations auraient été plus importantes tous les ans et surtout les années qui sont actuellement devenues des années de « faibles proliférations ». Même si le niveau actuel des flux ne garantit pas des faibles proliférations tous les ans.

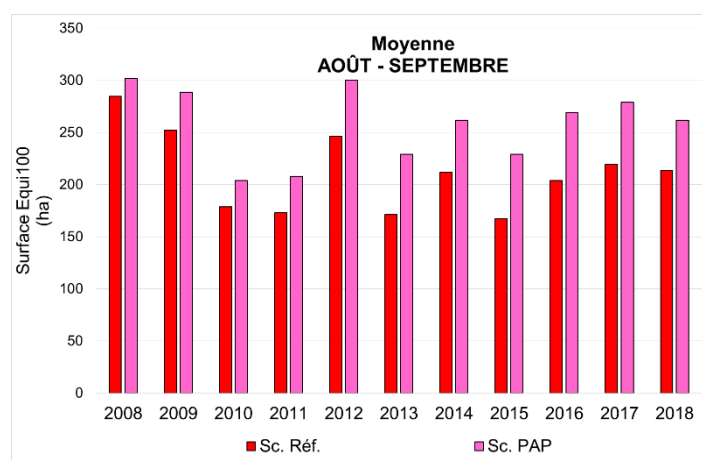


Figure 2 : Moyennes mensuelles (Août - Septembre) des surfaces en ulves modélisées à partir du scénario de référence (Sc. Réf.) et du scénario Pratiques Agricoles Passées (PAP).

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

2.2.1 - Principe

Pour réduire les fuites d'azote, on peut soit modifier les pratiques agricoles sur une majorité de la superficie agricole utilisée (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 3 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 3 : 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.

Pour la modélisation Eco-MARS3D-Ulves dans la baie, le CEVA a appliqué les résultats du scénario BSC « 10 % de surface convertie » permettant d'atteindre, en moyenne, 30 % d'abattement des flux d'azote aux exutoires des bassins versants, sur l'ensemble des années 2008-2018 pour la période mai – septembre par rapport à la situation de référence. Ce scénario a été appliqué dans TNT2 sur une période suffisamment longue pour atteindre son plein effet compte tenu de l'inertie des bassins versants, en répliquant les conditions météorologiques des deux dernières décennies.

Ce scénario appelé « **BSC-10%** » a été appliqué sans considérer que les tendances de l'année « n » (flux annuels et biomasse) aient de conséquence sur le démarrage de l'année « n+1 », ce qui constitue une hypothèse pessimiste. Or, la **reconduction inter-annuelle de la biomasse** est un facteur essentiel à l'initiation de la marée verte (démarrage précoce sur des flux saisonniers encore élevés). Par conséquent pour approcher cet effet reconduction, un second scénario « **BSC-10%-Recond** » a été simulé, en considérant que la baisse des biomasses de l'année « n » aurait un effet dont les bénéfices se cumuleraient année après année. Pour obtenir ce scénario « BSC-10%-Recond » plus optimiste, la saison de prolifération a été recalculée pour chaque année, avec un démarrage tardif de la croissance des ulves fixé au 15 juin de chaque année².

2.2.2 - Résultats TNT2 (azote nitrique à l'exutoire des BV)

Les figures 4 et 5 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.

² La prise en compte de la reconduction des biomasses d'une année sur l'autre était, dans la première version de l'étude, basée sur un abattement de la biomasse initiale égale au taux d'abattement observé en fin de saison n par l'application du BSC-10%. Cette méthode donnait des résultats très proches des simples simulations BSC-10% ; en effet le modèle est très peu sensible à des modifications de l'ordre de la dizaine de pourcent de la biomasse initiale (compensation rapide sur les premières semaines de croissance). La date du 15 juin, si elle est tardive, semble réaliste au vu des suivis des années antérieures lors de cycles de faibles proliférations d'ulves sur la baie.

Abattement Flux ANNUELS moyennés sur 3 ans

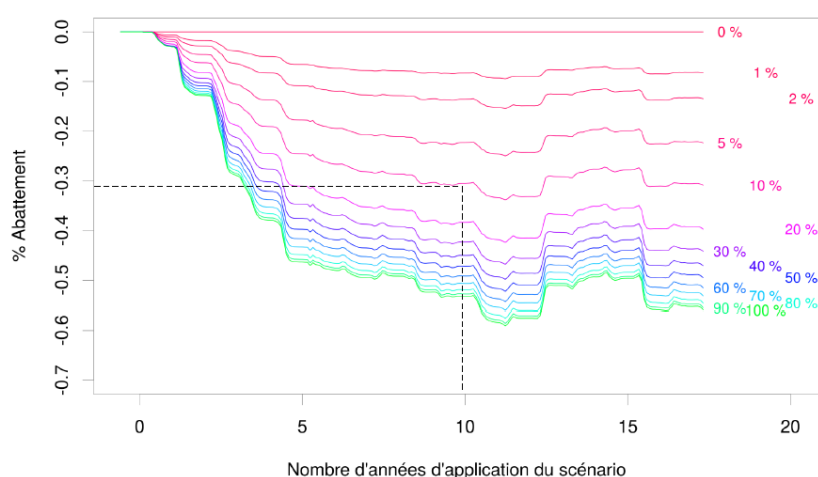


Figure 4 : Scénario BSC appliqué sur l'ensemble des trois bassins versants : Abattement ANNUEL du flux d'azote arrivant dans la baie, en fonction de la durée d'application du scénario, et ceci pour différentes valeurs de surface d'emprise du scénario représentées par les courbes de différentes couleurs (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.

Abattement Flux ESTIVAUX moyennés sur 3 ans

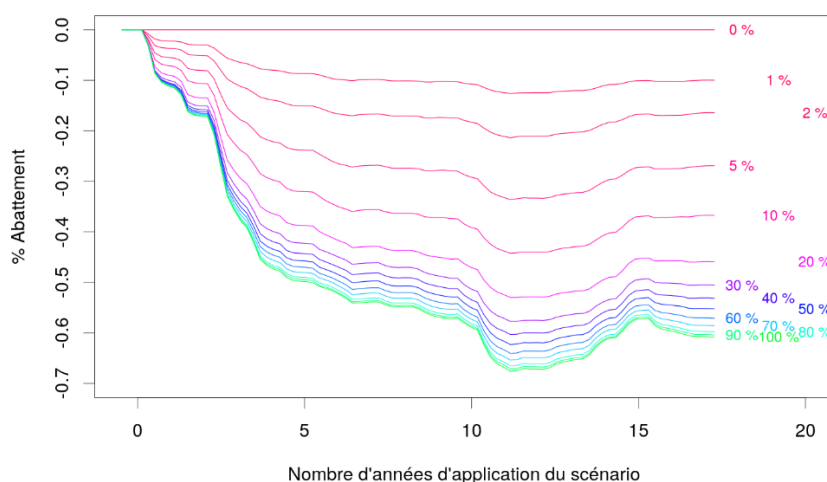


Figure 5 : Scénario BSC, ensemble des trois bassins versants : Abattement des flux ESTIVAUX (mai-septembre) en fonction de la durée d'application, pour plusieurs valeurs de surface d'emprise du scénario (0-100 %).

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 (Anse d'Yffiniac) 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 Eco-MARS3D-Ulves. **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 4 et 5.

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.

2.2.3 - Résultats Eco-MARS3D-Ulves (surface d'échouage d'ulves dans la baie)

Les surfaces d'échouages simulées selon **les scénarios BSC-10% et BSC-10%-Recond** sont représentées sur la figure 6 et comparées avec le scénario de référence.

L'évolution temporelle du contenu azoté dans les tissus algaux, selon les deux scénarios, ne présente pas de différence significative. Les résultats ne sont donc pas présentés ici.

Malgré une baisse de 30% du flux de nitrate à la baie en moyenne, pouvant se traduire selon les années par une baisse de près de 50% des flux de nitrate estivaux (mai-septembre), **le scénario BSC-10% n'entraîne pas une diminution très marquée des surfaces d'échouage d'ulves**. Ceci peut s'expliquer par une quantité d'azote aux exutoires, non limitante pour la croissance algale lors de l'installation des proliférations (flux printaniers encore importants). Néanmoins, cette simulation n'intègre pas le facteur « reconduction » d'une année sur l'autre qui sera impacté par la baisse des flux de l'année n-1 en BSC-10 % et de fait des stocks d'algues hivernaux.

Au contraire, le **scénario BSC-10%-Recond** intègre ce facteur de « reconduction » en ajoutant un démarrage retardé, à la baisse des flux du BSC-10 %. **Ce scénario génère des abattements notables** ; le démarrage de la croissance étant à une période plus tardive de l'année (15 juin), les flux à la baie sont déjà nettement diminués par rapport à la période printanière. Les ulves se trouvent alors rapidement limitées en azote et la prolifération est nettement diminuée avant que des biomasses trop importantes soient en place.

Il est pour l'heure difficile de trancher entre les deux hypothèses de reconduction. La réalité réside probablement entre ces deux scénarios. Les suivis nous montrent certaines années des démarrages très tardifs en lien avec de plus faibles proliférations de l'année n-1, mais nous montre aussi la possibilité, non simulée par le modèle, du développement d'autres espèces que les ulves dans ces conditions de flux plus bas.

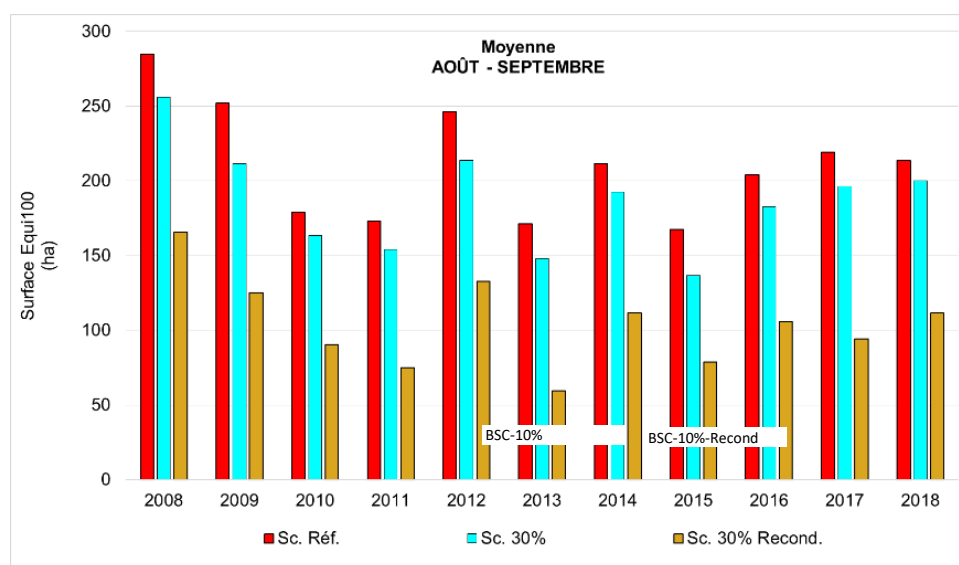


Figure 6 : Moyennes mensuelles « Août-Septembre » des surfaces en ulves modélisées à partir du scénario de référence (Sc. Réf.), du scénario BSC-10% et du scénario BSC-10%-Recond, en hectare équivalent 100%.

2.3 Scénario « Basses Fuites d'azote N» (BFN)

2.3.1 - 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.

Il est important de rappeler qu'il s'agit d'un exercice théorique ne prenant pas en compte les contraintes structurelles et socio-économiques des exploitations agricoles de la zone.

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 à base de ray-grass anglais (RGA)-trèfle blanc, fertilisées au fumier de bovins composté, fauchées et pâturées.
- Systématiser les couverts automnaux/hivernaux, notamment par le semis de ray-grass italien (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.

2.3.2 - Résultats TNT2 (azote nitrique à l'exutoire des BV)

La figure 7 ci-après synthétise les effets de l'application du scénario BFN et permet une comparaison avec le scénario précédent « baisse des surfaces agricoles » (BSC). Le scénario BFN a un impact similaire au scénario BSC convertissant 7% des zones (BSC-7%) sur l'ensemble des trois bassins versants, mais avec de fortes disparités entre bassins versants. Notamment, dans le bassin de l'anse d'Yffiniac (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 (BSC-10%).

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, pourtant importante, des pratiques sur l'ensemble de la surface sans remise en cause majeure de la productivité globale.

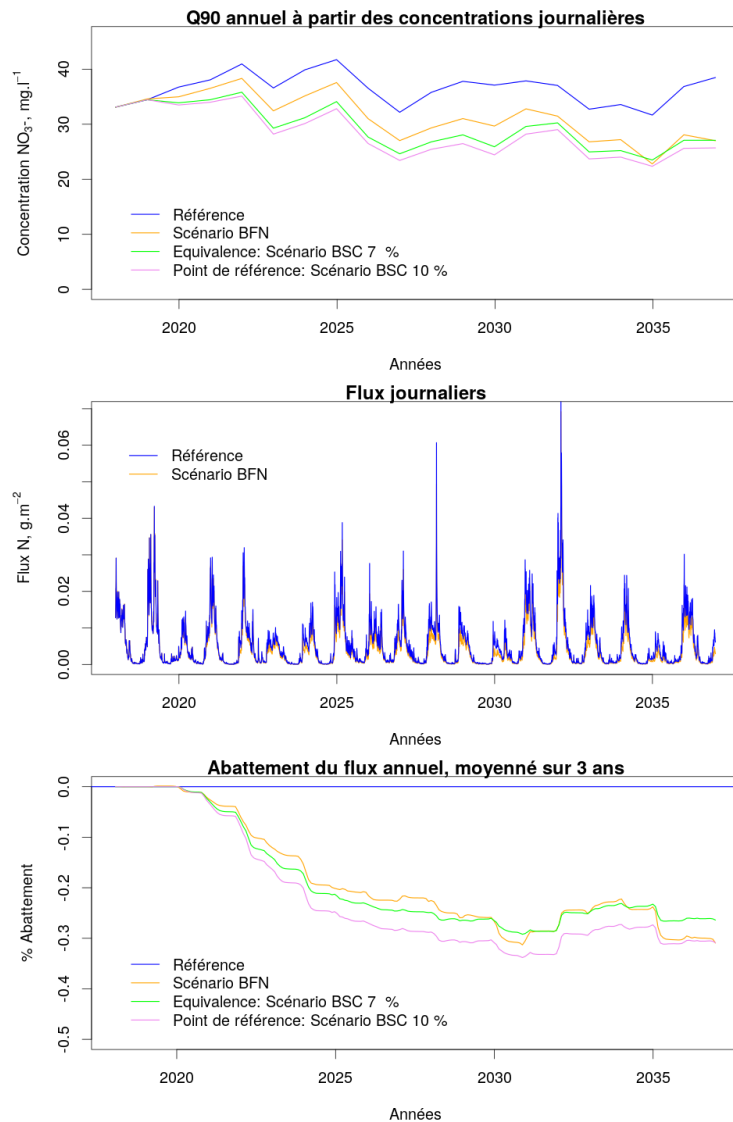


Figure 7 : Illustrations du scénario BFN et comparaison avec le scénario BSC. En haut, évolution du Q90 moyen des rivières pour la Référence (pas de changement par rapport à 2018) et les différents scénarios (BFN, BSC 7 % et BSC 10 %). On voit, comme sur le graphique du bas, que les scénarios BSC agissent 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.

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.**

Ce scénario BFN n'a pas été appliqué dans le modèle Eco-Mars3D-Ulves. Le CEVA a appliqué directement le scénario suivant qui croise BSC et BFN

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

2.4.1 - 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 azotée, 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) ?

2.4.2 – Résultats TNT2 (azote nitrique à l'exutoire des BV)

Les figures 8 et 9 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

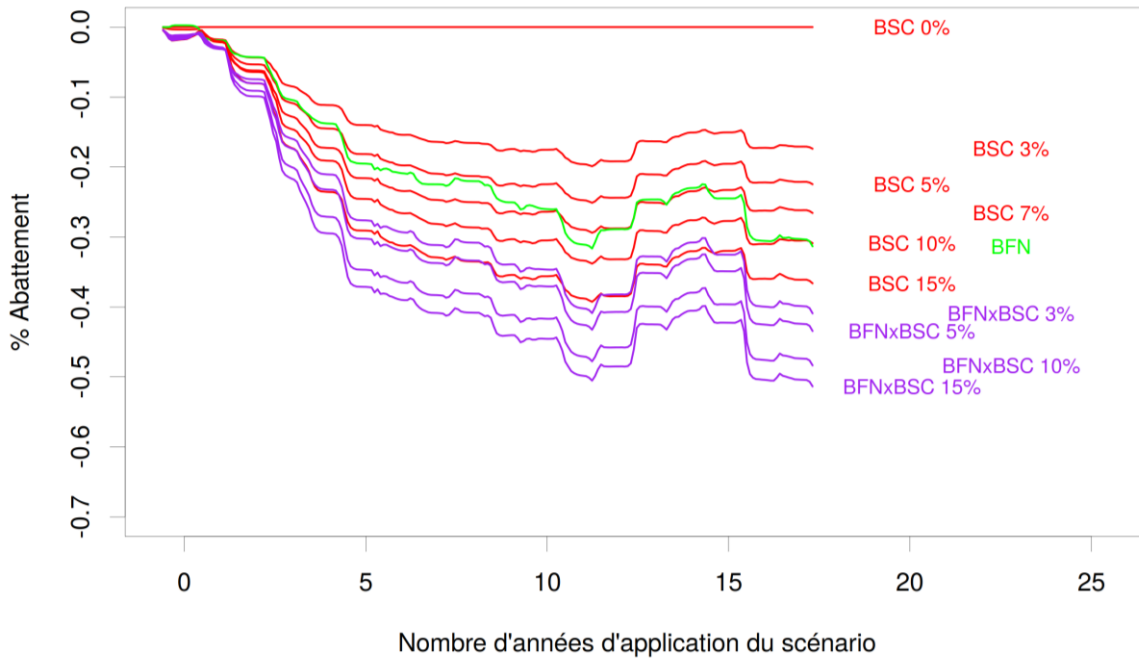


Figure 8 : Scénario croisé BSCxBFN. Ensemble des trois bassins versants. Abattement des flux ANNUELS en fonction de la durée d'application, pour plusieurs valeurs de surface d'emprise du scénario (en violet), ainsi que des résultats du scénario BSC et BFN (en rouge et en vert).

Abattement flux ESTIVAUX moyenné sur 3 ans

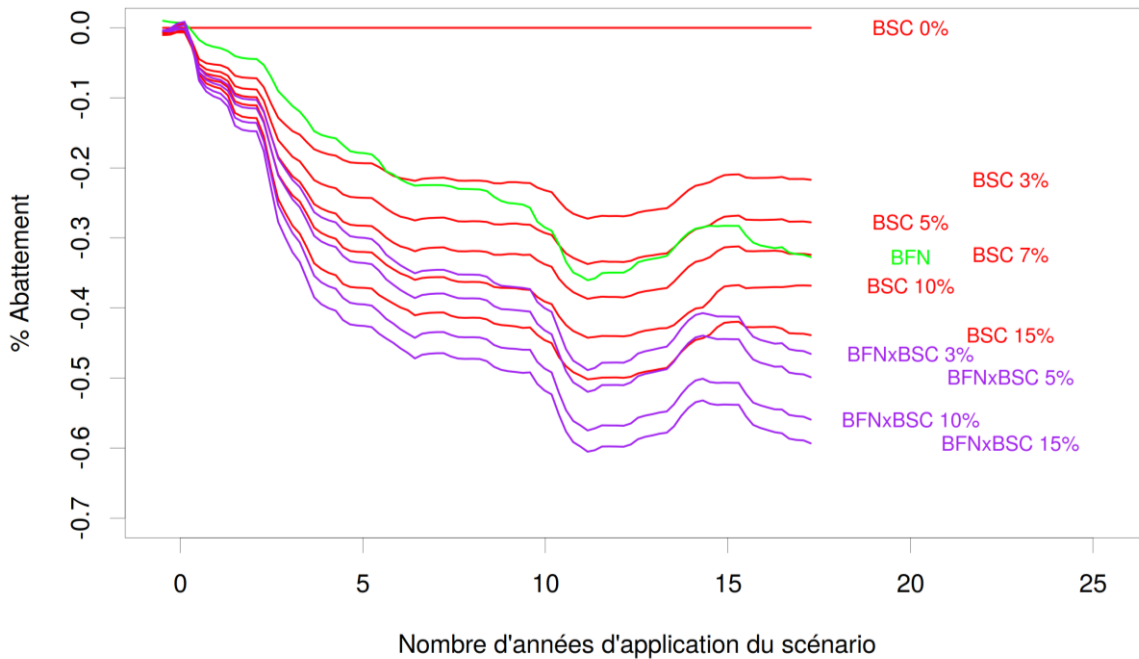


Figure 9 : Scénario croisé BSC x BFN. Ensemble des trois bassins versants. Abattement des flux ESTIVAUX en fonction de la durée d'application, pour plusieurs valeurs de surface d'emprise du scénario, ainsi que des résultats du scénario BSC et BFN.

2.4.3 – Résultats Eco-MARS3D-Ulves (surface d'échouage d'ulves dans la baie)

Les surfaces d'échouages et les quotas internes en azote et phosphore des ulves, simulés selon le scénario BSC-BFN, sont représentés en figure 10, avec également les mesures et les sorties du scénario de référence (Sc. Réf.).

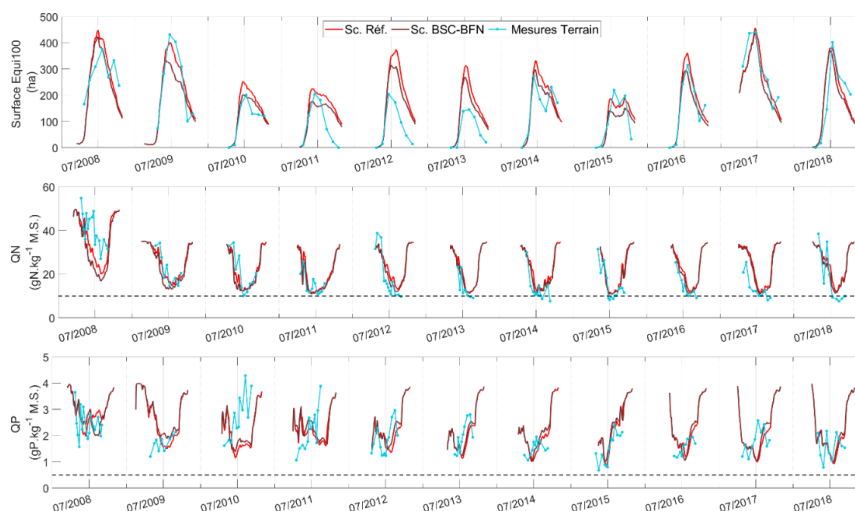


Figure 10 : Comparaisons modèle / mesures des surfaces et quotas simulés à partir du scénario de référence après amélioration (Sc. Réf.) et du scénario BSC-BFN sur la période 2008 - 2018. Les valeurs de quotas de substances en azote (10 gN.kg^{-1}) et phosphore (0.5 gP.kg^{-1}) utilisées dans le modèle sont représentées par les lignes horizontales pointillées.

En termes de surface d'échouage, les surfaces moyennes en ulves calculées entre août et septembre (période la plus significative face aux baisses de flux d'azote des scénarios) sont inférieures d'environ 15% par rapport au scénario de référence (Sc. Réf.) pour l'ensemble des années (Figure 11). Pour rappel, avec le scénario BSC-10%, ces surfaces d'échouage 'août-septembre' étaient inférieures d'environ 12% par rapport à la référence (Sc. Réf.). Comme pour le scénario BSC, le relativement faible impact de ces scénarios sur la biomasse algale de l'année n, malgré une diminution des flux, est principalement lié à des apports d'azote aux exutoires encore trop importants lors de l'installation des proliférations au printemps (sans considération d'une reconduction liée à une application répétée de ces baisses d'azote annuelles)

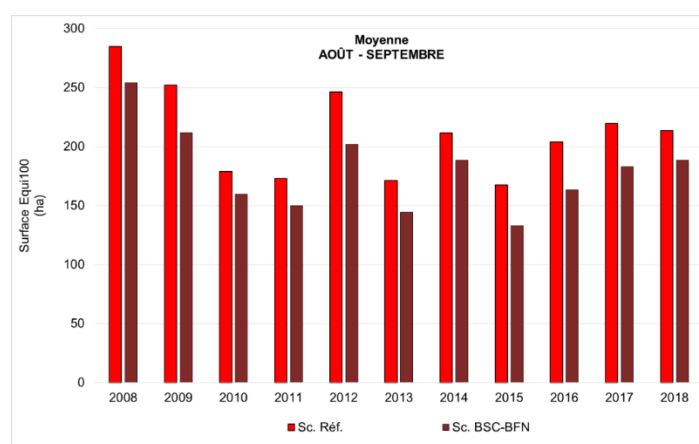


Figure 11 : Moyennes mensuelles 'Août – Septembre' des surfaces en ulves modélisées à partir du scénario de référence (Sc. Réf.) et du scénario BSC-BFN, en hectare équivalent 100%.

2.5 Scénario « 100% abattement »

2.5.1 - Principe

Ce scénario n'a pas été fourni par TNT2 en termes de pratiques agricoles sur le bassin versant (plus sévère que l'application d'un scénario 0 agriculture).

Il s'agit d'un scénario théorique testé avec le modèle Eco-MARS3D-Ulves en appliquant des flux terrigènes d'eau douce sans nitrate provenant des trois exutoires (Gouët, Urne et Gouessant). Les flux d'ammonium et d'azote organique des cours d'eau, le flux sédimentaire et les flux en provenance des limites marines ont été conservés comme identique au scénario de référence.

Ce scénario a été calculé sur l'ensemble de la période, afin de visualiser l'effet de la limite basse maximale théorique³ de réduction des nitrates dissous terrigènes (zéro nitrate) sur le développement d'algues vertes en baie de Saint-Brieuc.

2.5.2 – Résultats Eco-MARS3D-Ulves (surface d'échouage d'ulves dans la baie)

Les surfaces d'échouages et les quotas internes en azote et phosphore des ulves, simulés selon ce scénario « 100% Abattement », sont représentés en figure 12, avec les résultats des mesures et du scénario de référence.

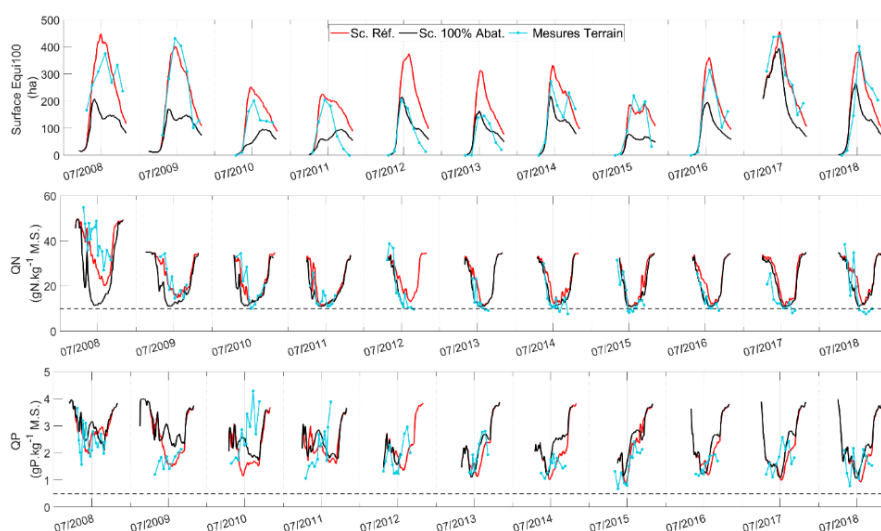


Figure 12 : Comparaisons modèle / mesures des surfaces et quotas simulés à partir du scénario de référence après amélioration (Sc. Réf.) et du scénario 100% Abattement sur la période 2008 - 2018. Les valeurs de quotas de substances en azote (10 gN.kg^{-1}) et phosphore (0.5 gP.kg^{-1}) utilisées dans le modèle sont représentées par les lignes horizontales pointillées.

Les surfaces en ulves simulées uniquement à partir des flux d'azote autre que le nitrate terrigène sont présentées en noir figure 8. Elles représentent ainsi les surfaces minimales théoriques si on arrivait à supprimer l'ensemble du nitrate présent aux exutoires.

L'abattement des surfaces en ulves simulées serait au maximum d'environ 50% en moyenne sur la période aout-septembre entre 2008 et 2018 si on retirait l'ensemble du nitrate terrigène aux exutoires de la Baie de Saint Brieuc. Ce niveau d'abattement conjugué à la

³ Cette valeur de limite basse est la valeur de biomasse minimale que le modèle peut atteindre avec l'ensemble des flux d'azote (NH_4 , Norg, N sédimentaire et marin) autre que le nitrate terrigène en gardant les autres paramètres identiques (biomasses initiales, ...).

baisse significative de la reconduction hivernale (non simulée ici) amènerait très probablement à un point de rupture écologique, avec pour conséquence l'absence de reconduction des ulves et le possible remplacement de celles-ci par d'autres espèces algales. Ce scénario est en effet conforté par l'apparition de plus en plus fréquente de prolifération de macroalgues « autres que les ulves » en baie de Saint Brieuc lors d'année de faibles flux. Ces successions algales verraient leur origine dans l'amélioration de la qualité des masses d'eau et donc la diminution de l'eutrophisation du milieu peu favorable aux ulves.

3. IMPACTS POTENTIELS SUR LES MAREES VERTES SELON LES ANNEES

Les résultats des simulations nous apportent des informations pour avancer dans la compréhension du contrôle des marées vertes par les flux nitriques selon leur niveau saisonnier, les stocks résiduels d'algues et les conditions météorologiques.

La figure 13 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.

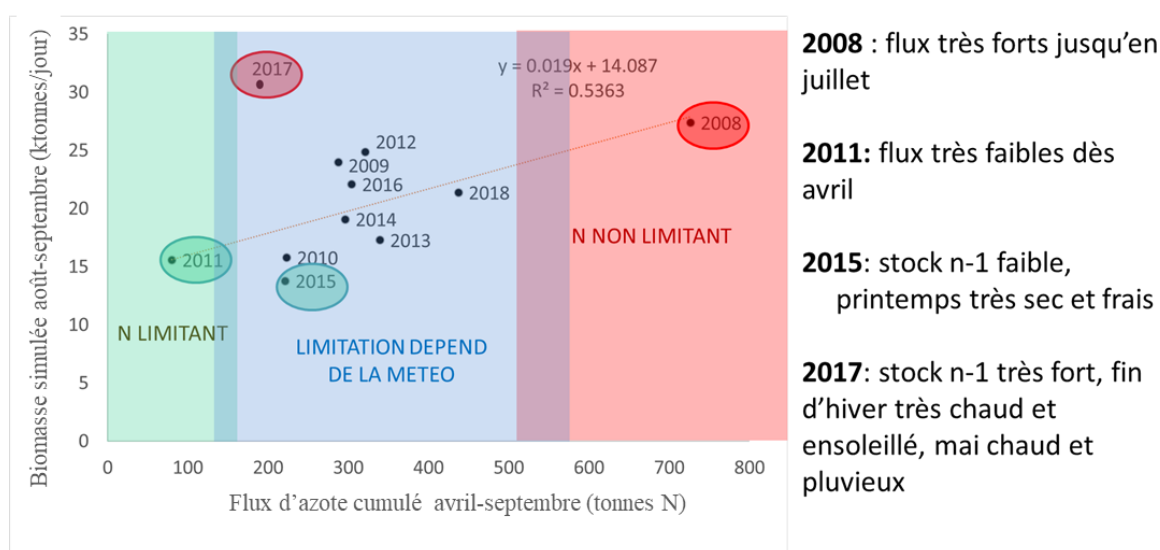


Figure 13 - Relation entre flux d'azote estivaux (tonnes N) et biomasse d'algues (kt/j), simulés sur la période 2008-2018.

On peut expliquer cela grâce à l'estimation de la limitation de la croissance par l'azote par Eco-MARS3D-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. Ces sorties de modèles sont largement confirmées par les mesures de terrain effectuées lors de ces années.

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

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 (hiver le moins dispersif de la série) et un printemps chaud et ensoleillé, a pu se poursuivre longtemps du fait de fortes pluies en juin retardant la limitation par l'azote.

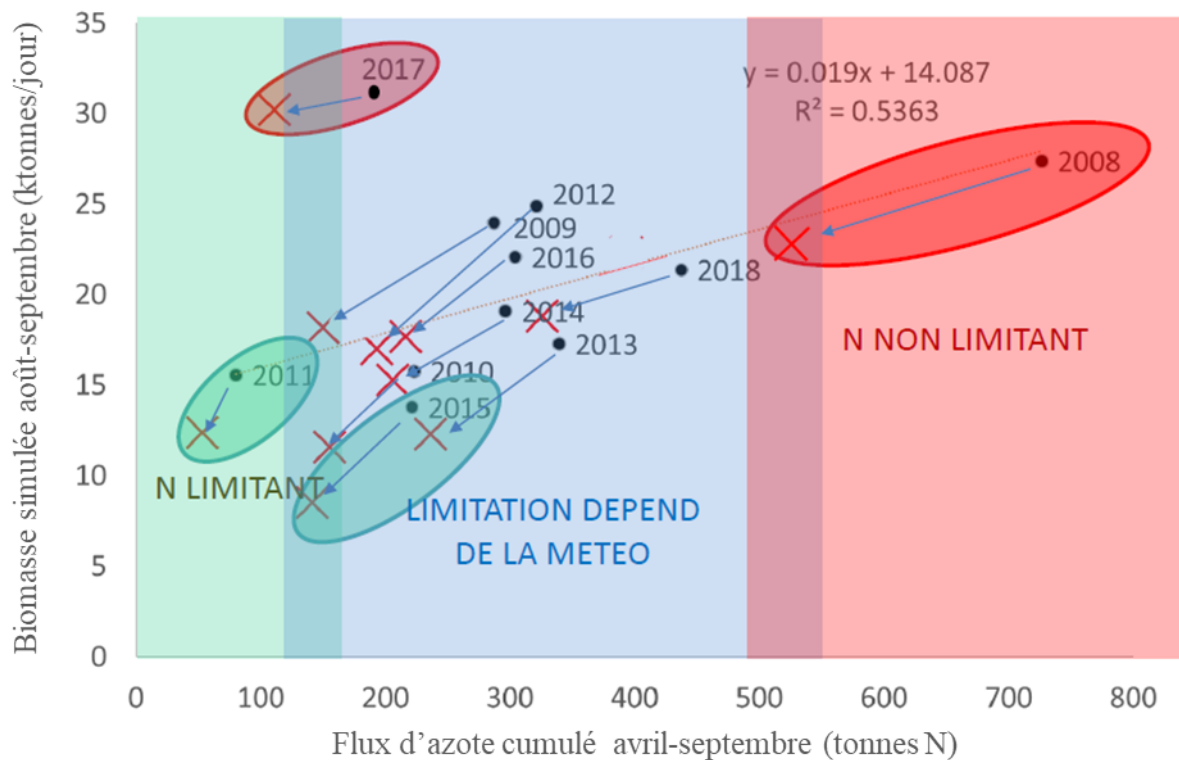


Figure 14 : Relation entre flux d'azote estivaux (tonnes N) et biomasse d'algues (kt/j), simulés sur la période 2008-2018 (points bleus) et pour le scénario BSC 10 % (croix rouges). Les flèches montrent le déplacement pour une même année climatique, entre le scénario de Référence et le scénario BSC 10 %.

Si l'on reporte sur le même graphique les simulations avec les flux du scénario BSC 10 % (figure 14), 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.

4. 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 de l'air, +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. En revanche, 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.

Par conséquent, 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.

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 que celle mesurée en fin des années 90 début 2000. Pour ce scénario, le couplage TNT2 avec Eco-MARS3D-Ulves montre que 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 fauchées et 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 et de moindre ampleur, 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 souhaitées dans les programmes de lutte contre les algues vertes (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 BSC-10%**, entraînant une baisse de flux d'azote de 30 %, génère une diminution modérée des surfaces d'échouage. En revanche, cette simulation associée à une reconduction hivernale (flux N et stocks ulves) d'une année sur l'autre (**scénario BSC-10%-Recond**) engendre, dès le début de la prolifération, une limitation de la croissance des ulves par l'azote, entraînant *in fine* de faibles surfaces d'échouage (diminution de ~50%). Cela illustre que si la prolifération ne disparaît pas sur une année n, du seul fait d'une limitation des flux sur une année, on peut en attendre un effet pluriannuel sur l'équilibre écologique de la baie avec des reports d'ulves moindres sur l'année n+1 impliquant des proliférations maximales atténuées et même des changements d'espèces (e.g. prolifération de macroalgues brunes de type *Pylaiella*) comme déjà observés sur certaines baies dont celle de Saint Briec. Les composants de ce « nouvel équilibre écologique » ne sont à ce jour pas intégrés dans le modèle mais les résultats fournis par la présente étude permettent déjà d'indiquer d'aller vers des objectifs d'abattement en flux de nitrates qui soient au-delà de 30 %.

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 parcelles 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 des baisses de flux potentiellement très importantes**, notamment sur la période estivale. Le potentiel d'efficacité de BSC appliqué à BFN reste élevé, montrant ainsi 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.

Toutefois, malgré des diminutions de flux de nitrate estivaux (mai-septembre) de l'ordre de 50%, la dynamique des proliférations reste sensiblement la même et entraîne, selon les scénarios, **des diminutions moyennes de prolifération de l'ordre de 15% seulement, sur la période août-septembre**. Cependant, on note que les années de flux bas, cette diminution est supérieure et proche de 20%. La seule baisse des flux sur une année (sans tenir compte d'effet pluriannuel sur la reconduction des ulves) ne permet donc pas, d'après la modélisation, une diminution drastique des proliférations par rapport à la même année de référence.

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.

Le couplage du modèle TNT2 avec le modèle Eco-MARS3D-Ulves permet de mieux préciser l'impact des changements sur le bassin versant simulés sur les marées vertes, et de mieux apprécier les baisses de flux nécessaires à l'atteinte des objectifs de qualité des eaux littorales. Cette étude apporte des conclusions et 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 (donc des 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 sur la limitation des flux N**, pour passer à un régime où les stocks automnaux d'algues seront suffisamment faibles pour empêcher toute reprise précoce, ou bien intervenir pour limiter fortement ces stocks automnaux ou les stocks de fin hiver.

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 réaction 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.