



FLAM : Efflorescences microalgales en Manche - rôle des bassins versants dans le développement du phytoplancton toxique

-

FLAM: Microalgae blooms in the Channel - Watershed impact on toxic phytoplankton development

Programme LITEAU IV

Entrée n° 1 : Quelle articulation entre la trame verte et bleue et une trame bleu-marine ?

Entrée n° 3 : Stratégie et prospective, protéger et aménager le littoral et l'interface maritime de demain

Rapport de synthèse

IFREMER¹, UMR METIS-Université Paris 6², UMR BOREA-Université de Caen³, Missions Publiques⁴, AESN⁵

¹RIOU P, BERGER H, CUGIER P, LE GENDRE R, MENESGUEN A, SCHAPIRA M

²BILLEN J, GARNIER J, PASSY P, RAMARSON A, THERY S

³CLAQUIN P, FAUCHOT J

⁴BELLIOT E, MATHIEU Y, VERGNE A

⁵BRUCHON F, PEDRON S

Mots clés : Microalgues toxiques, *Pseudo-nitzschia*, Manche, bassins versants, flux sels nutritifs, écosystème marin, modélisation, scénarios, science participative

N° de contrat : **12-MUTS-LITEAU-4-CVS-016 2012 – n°CHORUS 2100 949 494**

Date de notification du contrat : **23 novembre 2015**

Date de remise du rapport final : **novembre 2015**

Identité et coordonnées du responsable du projet de recherche : **P Riou, IFREMER-LER/Normandie**

Autres partenaires scientifiques bénéficiaires : **Agence de l'Eau Seine Normandie**

Partenaires gestionnaires : **Agence de l'Eau Seine Normandie**

Contexte

Les eaux côtières continentales de la Manche, depuis les côtes normandes jusqu'aux côtes picardes, sont soumises à l'influence majeure des apports déséquilibrés de nutriments de la Seine. Il en résulte, dans le panache du fleuve, un état d'eutrophisation chronique. En parallèle, plusieurs épisodes d'efflorescences microalgales indésirables compromettant les activités de pêche et conchyliculture ont été observés dans cet écosystème. Historiquement, deux crises majeures de toxicité due à l'acide domoïque produit par les diatomées *Pseudo-nitzschia* spp. se sont produites en 2004 (Nézan et al., 2006), 2011 et 2012 (données Ifremer), entraînant la fermeture partielle de la pêche de coquille Saint Jacques en Baie de Seine pendant plusieurs mois.

Le chaînage d'un modèle biogéochimique de bassin versant (Seneque/Riverstrahler) et d'un modèle de la dynamique de l'écosystème marin (ECOMARS-3D) a permis de bien appréhender le cadre général de ces phénomènes (Garnier et al., 2012, Passy et al. (sous presse)), même si des interrogations subsistent quant au déterminisme et à la physiologie des microalgues toxiques du genre *Pseudo-nitzschia* et sur les liens entre dystrophie et production de toxines. La faisabilité de l'exploration, à l'aide de ces modèles, de scénarios de modification de la gestion des eaux usées ou de pratiques agricoles dans le bassin versant a été démontrée. Cependant, au-delà du signal dominant du panache de la Seine, il apparaît des différences locales de niveau d'eutrophisation et d'occurrence d'épisodes de toxicité entre zones littorales et côtières, qui demandent à mieux préciser la qualité des différents apports fluviaux, ceux de la Seine et des petits fleuves côtiers, dont les bassins versants définissent collectivement un '**territoire littoral**' ; les activités humaines (agricoles et urbaines, gestion des zones humides) dans ce territoire ont des conséquences directes sur le fonctionnement de l'écosystème marin côtier. C'est cette relation entre systèmes littoraux terrestres et marins que le projet visait à appréhender par une approche de modélisation venant en appui à une démarche originale de concertation avec les acteurs du territoire pour définir un plan d'action basé sur un diagnostic et des objectifs partagés.

Objectifs

Le projet visait donc à développer une double démarche à la fois scientifique et participative autour de la question des efflorescences de microalgues indésirables en Manche orientale. Elle visait à mettre en relation:

- (i) l'acquisition expérimentale des connaissances encore requises sur le déterminisme des épisodes d'efflorescences toxiques (**Axe 1**);
- (ii) l'adaptation ou la construction des outils de modélisation adéquats couplant le fonctionnement des bassins versants de la Seine et des fleuves côtiers avec celui des zones marines côtières et littorales (**Axe 2**); cette chaîne de modèles, des têtes de bassins aux zones côtières constitue un véritable outil d'exploration du continuum aquatique permettant de quantifier les liens entre les trames vertes (bassins versants) et bleues (réseaux hydrographiques) et bleu-marine (incluant une zone marine protégée). Cette démarche à une échelle saisonnière et territoriale est tout à fait originale sur le plan national et international.
- (iii) la co-construction avec les acteurs territoriaux (Etat, collectivités, associations, représentants des professionnels des filières pêche et conchyliculture) de scénarios de changement de pratiques agricoles et de gestion des zones humides, et l'exploration de leurs conséquences par les modèles (**Axe 3**). Les scénarios ont été construits pour constituer une aide à la protection du littoral en lien avec une stratégie de gestion des bassins versant.

Le projet est focalisé sur la zone de la Manche orientale, c'est à dire de la presqu'île du Cotentin jusqu'à la frontière belge. L'approche de modélisation est réalisée sur plusieurs échelles spatiales afin de répondre à différentes questions complémentaires. La partie "terrestre" de la modélisation du continuum aquatique bassins versants-zone côtière, outre la Seine couvre également l'ensemble des fleuves côtiers de Normandie. Les apports de tous ces bassins versants sont par la suite couplés au modèle d'écosystème marin. Deux emprises marines étaient initialement envisagées, une détaillée dont l'extension se limitait à la Manche Est et une autre plus vaste mais plus grossière couvrant la zone Manche-Golfe de Gascogne. Finalement, seule l'emprise Manche-Golfe de Gascogne a été utilisée pour cette étude, d'abord pour des raisons opérationnelles (rapidité de calcul) mais aussi pour éprouver le modèle *Pseudo-nitzschia* et vérifier sa réponse au delà du strict cadre de la Manche Orientale.

Le modèle d'écosystème marin est utilisé pour mieux appréhender et comprendre le caractère spatial des efflorescences du genre *Pseudo-nitzschia*, la production de toxine associée à certaines de ces diatomées, notamment en étroite relation avec la disponibilité en nutriments sur les différentes zones. La zone de la Baie de Seine, grâce au nombre important de mesures disponibles (fréquence des réseaux de suivi des nutriments, flores phytoplanctoniques, toxicité dans les coquilles Saint Jacques en 2004 et 2011), constituait une zone privilégiée pour améliorer la paramétrisation du module *Pseudo-nitzschia* développé par Pénard (2009). Le rôle du filtre estuarien (via le piégeage de la silice par les diatomées d'eau douce outre les transformations du phosphore et l'azote) sur la disponibilité en nutriments en sortie d'estuaire est également un sujet d'étude dans le cadre de ce projet, afin *in fine* d'améliorer la pertinence de la chaîne de modélisation des têtes de bassins versants à la zone côtière.

Cet outil de modélisation a été conçu de manière à répondre aux questionnements des acteurs de la gestion du milieu littoral, au premier rang desquels les Agences de l'Eau, les gestionnaires de Parcs Naturels Marins et les organisations de pêcheurs. Des tables rondes de débats participatifs ont été organisées pour confronter les points de vue de ces acteurs, leurs questionnements, et les réponses que peut apporter le monde de la recherche. L'objectif général est que les acteurs de la gestion des bassins versants et les utilisateurs des milieux littoraux s'approprient les connaissances les plus récentes (même encore en construction) sur les processus de déclenchement des efflorescences microalgales toxiques et sur les effets de mesures concrètes à l'échelle du territoire qu'ils ont en charge.

Présentation de l'équipe FLAM



Figure 1 : Présentation du consortium FLAM lors de l'atelier de restitution

L'équipe scientifique, coordonnée par un laboratoire à fort ancrage territorial dans la zone d'étude, était constituée d'un consortium de laboratoires qui ont apporté des compétences complémentaires pour la mise en œuvre de la démarche :

- **IFREMER – LER/N, Laboratoire Environnement et Ressources de Normandie (R Le Gendre, P Riou, M Schapira)** a coordonné l'ensemble de la démarche et a apporté son expérience et ses connaissances sur la phénologie des microalgues toxiques.
- **UMR BOREA - Université de Caen Basse Normandie (P Claquin, J Fauchot)** a apporté son expertise sur l'écophysiologie, l'écologie et le cycle de vie des microalgues du genre *Pseudo-nitzschia*.
- **UMR METIS - UPMC/CNRS (G Billen, J Garnier, P Passy, A Ramarson, S Thery,)** s'est chargée de la mise au point des modèles de bassin versant, dont les sorties ont alimenté les modèles de l'écosystème marin. Elle a réalisé des campagnes de mesures de terrain en milieu estuarien. Elle a participé aussi activement à l'animation scientifique des groupes de discussion visant à l'élaboration des scénarios et la traduction de ces scénarios en conditions d'entrées pour les modèles.
- **IFREMER – DYNECO/BENTHOS (H Berger, P Cugier, A Ménesguen,)** a géré la modélisation marine, la formulation et l'implémentation des modules d'algues toxiques et la fourniture des conditions limites.
- **Agence de l'Eau Seine Normandie (F Bruchon, S Pédron)** a participé activement à la réflexion scientifique des 3 axes du projet FLAM, en tant que partenaire scientifique de FLAM mais aussi en tant que gestionnaire.
- **MISSIONS PUBLIQUES (A Beauvilain, E Belliot, Y Mathieu, A Vergne)** a eu la charge de recenser l'ensemble des acteurs concernés par les thématiques de ce projet et provenant d'horizons divers (Etat, collectivités, Société civile, scientifiques, associations, citoyens) et des enjeux de territoire, ainsi que de l'organisation et de l'animation des deux tables rondes.

Introduction

Le projet FLAM s'est organisé selon 3 Axes :

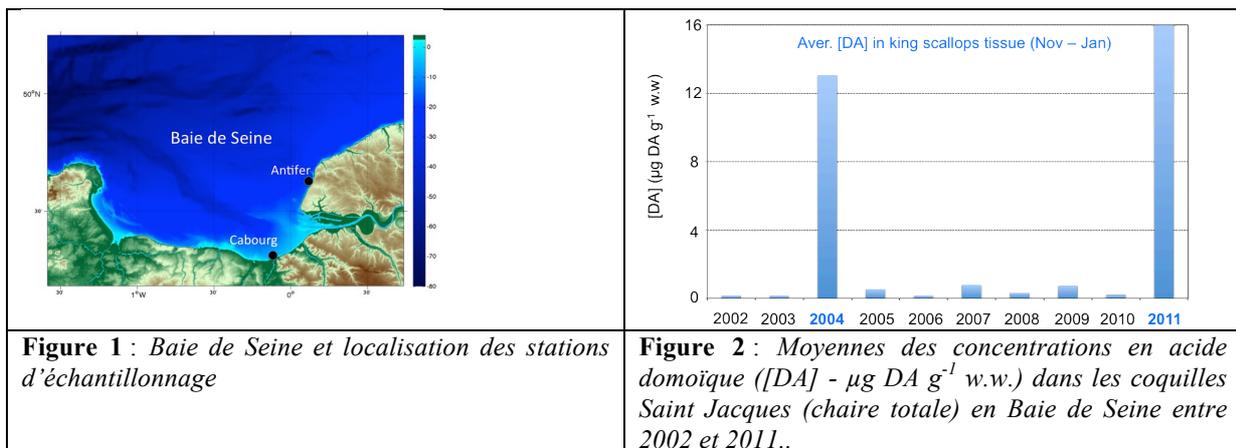
Axe 1 : Phénologie des efflorescences de *Pseudo-nitzschia* spp. en Baie de Seine. Acquisition expérimentale des connaissances encore requises sur le déterminisme des épisodes d'efflorescences toxiques

Axe 2 : Chaîne de modélisation des continuums aquatiques. Construction des outils de modélisation couplant le fonctionnement des bassins versants de la Seine et des fleuves côtiers avec celui des zones marines côtières et littorales

Axe 3 : Co-construction de scénarios et d'un plan d'action d'amélioration de la situation : Organisation de Tables Rondes d'acteurs pour co-construire des scénarios de changement de pratiques et de gestion, et pour explorer leurs conséquences à l'aide des modèles.

Synthèse Axe 1

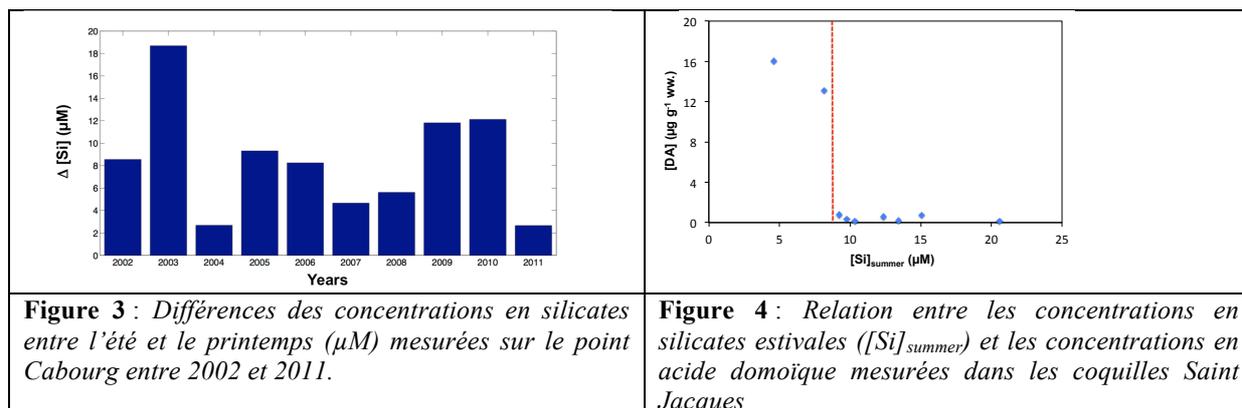
Les eaux côtières continentales de la Manche Orientale (zone d'étude), depuis les côtes normandes jusqu'aux côtes picardes, sont soumises à l'influence majeure des apports déséquilibrés de nutriments de la Seine. Il en résulte, dans le panache du fleuve, un état d'eutrophisation chronique. En parallèle, plusieurs épisodes d'efflorescences microalgales indésirables compromettant les activités de pêche et conchyliculture ont été observés dans cet écosystème. *Pseudo-nitzschia* spp. est une microalgue siliceuse appartenant au groupe des diatomées. C'est un genre cosmopolite échantillonné régulièrement sur nos côtes (cf REPHY –fig1-) ou il s'est parfaitement adapté aux conditions environnementales présentes sur notre littoral. La baie de Seine est devenue le siège d'efflorescences régulières à *Pseudo-nitzschia* spp.. Parmi ce genre, certaines espèces produisent une phycotoxine (l'acide domoïque) de type amnésiant (*ASP Amnesic Shellfish Poisoning*) qui se transmet dans la chaîne trophique, notamment chez les bivalves filtreurs comme la coquille St Jacques, pour lesquels cette diatomée est une source de nourriture directe. L'acide domoïque accumulé principalement dans l'hépatopancréas des coquillages n'est pas nocif pour ces bivalves, mais plutôt pour les consommateurs secondaires, tels que l'homme.



Historiquement, deux crises sanitaires majeures, due à l'acide domoïque produit par *Pseudo-nitzschia* spp. et concentré dans les coquilles St Jacques, se sont produites en 2004 (Nézan et al., 2006), 2011 et 2012 (données Ifremer –fig2-), entraînant la fermeture partielle, voire totale, de la pêche de coquille Saint Jacques en Baie de Seine pendant plusieurs mois. Durant ces deux épisodes toxiques, la présence d'une espèce a été observée systématiquement, il s'agit de *Pseudo-nitzschia australis*, dont la toxicité est 150 fois plus élevée qu'une espèce basique (Le Bec com pers).

Grâce aux campagnes d'observations *in situ* issues du réseau REPHY, mais aussi organisées dans le cadre du projet FLAM, et enfin aux travaux expérimentaux (en laboratoire), le présent projet a permis d'avancer significativement sur la compréhension de l'écologie de ce genre *Pseudo-nitzschia*, mais aussi sur les principales espèces échantillonnées sur nos côtes et reconnues comme toxiques. En effet, lors des campagnes d'échantillonnages, *Pseudo-nitzschia* a été principalement observée dans les zones de panache, en ce qui nous concerne celui de la Seine. Les apports en nutriments, et les rapports entre eux, semblent déterminants dans l'apparition des événements toxiques. En effet, les années 2004 et 2011 présentent des conditions nutritives différentes de celles observées généralement sur la zone, et se caractérisent par une limitation potentielle du phytoplancton par les silicates au cours de l'été. La figure 3 représente la différence entre les concentrations estivales et printanières de [Si] sur le point Cabourg pour chaque année entre 2002 et 2011. Les résultats mettent en évidence une forte variabilité inter-annuelle, avec des valeurs variant de 2.4 µM en 2004 et 18.4 µM en 2003.

Les plus faibles variations de la série de 10 ans sont observées en 2004 et 2011, avec une augmentation de seulement 2.4 μM des concentrations en silicates entre l'été et le printemps.



Il semble donc exister un lien, entre une limitation en silice et/ou l'azote et l'apparition d'événements toxiques ASP majeurs en Baie de Seine. Par ailleurs, une relation significative ($p < 0.05$) est observée entre les $[\text{Si}]$ en été et $[\text{DA}]$ dans les coquilles Saint Jacques (Fig. 4)

Les expérimentations en laboratoire (mise en culture de différentes espèces de *Pseudo-nitzschia*) ont permis d'améliorer nos connaissances sur l'écophysiologie de ces diatomées. En effet, ces travaux ont permis la mise en évidence d'*optima* de croissance en fonction de la lumière et de la température. Ces expérimentations ont également montré que l'excès d'azote concomitant à une carence en silice ou phosphore peut conduire les espèces étudiées à produire de l'acide domoïque. Les liens entre flux de sels nutritifs issus des bassins versants et efflorescences de *Pseudo-nitzschia*, mais également production d'acide domoïque, sont donc confirmés.

Synthèse Axe 2

L'axe 2 est dédié à la mise au point et au couplage des outils permettant la modélisation (i) des flux de nutriments issus des bassins versants, (ii) du transfert vers le milieu marin et (iii) de l'évaluation de l'impact sur les niveaux de production primaire et les efflorescences de microalgues, notamment toxiques.

Concernant les bassins versants, la version 3.6 du logiciel Seneque/Riverstrahler, a été utilisée dans le cadre de ce projet. Il s'agit d'un modèle biogéochimique décrivant le transfert des nutriments depuis les milieux terrestres d'un bassin versant jusqu'à l'exutoire du réseau hydrographique. Il permet le calcul des flux et des concentrations de nutriments en tout point du réseau hydrographique à partir des contraintes constituées par la morphologie et l'hydrologie du réseau de rivières, des apports ponctuels liés aux rejets urbains et des apports diffus résultant des pratiques agricoles. Ces derniers sont évalués à partir d'une représentation de l'ensemble de la chaîne agro-alimentaire du territoire (GRAFS, Billen et al, 2014), qui permet le calcul des surplus azotés des terres arables et des prairies permanentes qui déterminent les apports diffus de nitrates vers l'hydrosystème (Fig. 5).

Concernant le modèle d'écosystème marin, les résultats *in situ* et *in vitro* acquis dans le cadre de l'axe 1 concernant le cycle de vie de *Pseudo-nitzschia* ont contribué significativement à la mise au point du modèle écologique ECO_MARS3D (fig 6). En effet, ceux-ci ont permis d'affiner plus particulièrement le module spécifique développé dans le cadre de ce projet, qui simule l'évolution de *Pseudo-nitzschia* spp. en fonction des paramètres environnementaux. Le processus de production de l'acide domoïque y est fondé sur le quota cellulaire en silicium (fig 7).

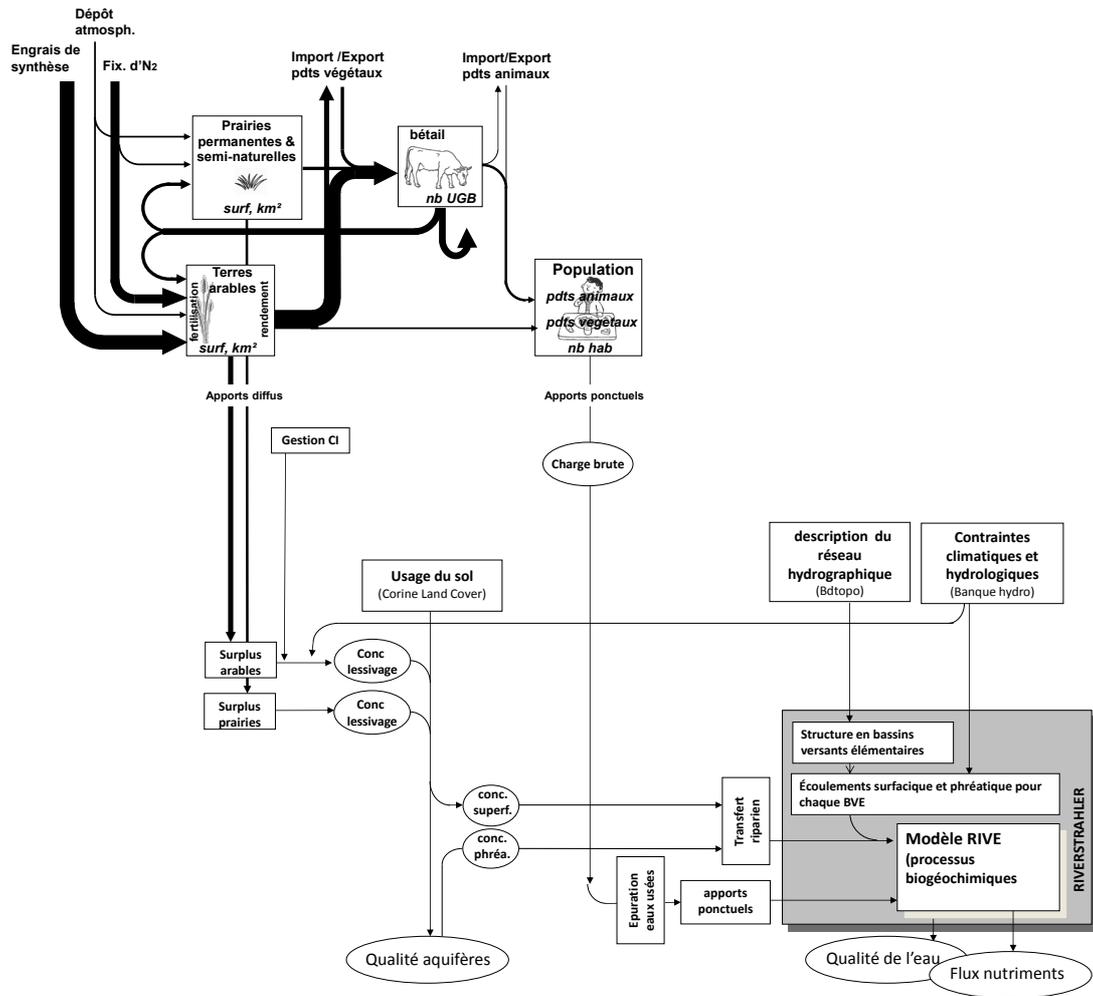


Figure 5. Connexions entre le modèle GRAFS et le modèle Riverstrahler, permettant l'évaluation des conséquences d'une modification structurale du système agro-alimentaire en termes de qualité de l'hydrosystème

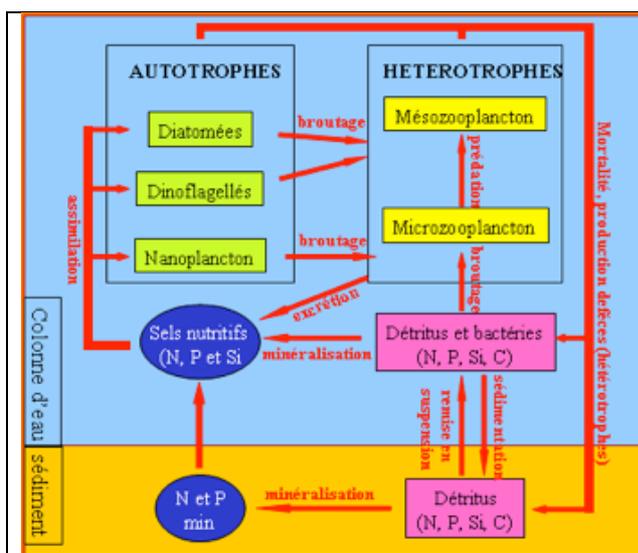


Figure 6 : Schéma conceptuel du modèle biogéochimique général ECO-MARS3D

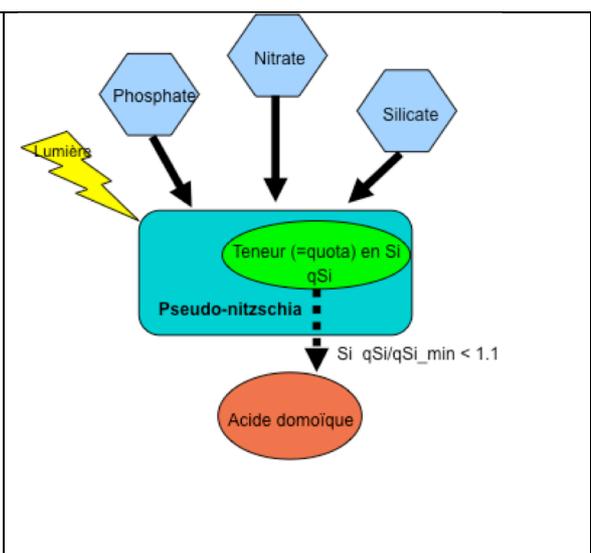


Figure 7 : Schéma conceptuel du modèle *Pseudo-nitzschia* sp. (adapté de Davidson et Fehling, 2006)

Synthèse Axe 3

L'objectif de l'axe 3 est de co-construire avec les acteurs des usagers des bassins versants mais aussi du monde de la mer des scénarios de restructuration des pratiques, voire de réorganisation de la chaîne agro-alimentaire, et d'en mesurer leurs impacts sur l'écosystème marin et notamment sur les efflorescences d'algues toxiques. Par conséquent, comme prévu, deux ateliers de science participative ont été organisés dans la seconde moitié du projet. Le premier a eu lieu en octobre 2014 à l'Abbaye aux Dames (enceinte du conseil régional de Basse Normandie) et avait pour double objectif de présenter le projet et la démarche mais surtout de co-construire avec les acteurs territoriaux (Etat, collectivités, associations, représentants des professionnels des filières pêche et conchyliculture) des scénarios de changement des pratiques agricoles et de gestion des zones humides. Les scénarios ont été réfléchis pour constituer une aide à la protection du littoral en lien avec une stratégie de gestion des bassins versants. Le deuxième atelier a été organisé en octobre 2015 afin de présenter à ces mêmes acteurs l'exploration des conséquences de ces scénarios par les deux types de modèles.

Il a déjà été démontré que les activités humaines (agricoles et urbaines, gestion des zones humides) dans ce territoire avaient des conséquences directes sur le fonctionnement de l'écosystème marin côtier (étude GIP-SA NEREIS). En effet, l'azote est potentiellement responsable de l'eutrophisation lorsqu'il est en excès par rapport à la silice. Le phosphore est aussi apporté par les bassins versants mais néanmoins les flux ont largement diminué ces deux dernières décennies (divisé par 3). L'azote et le phosphore sont apportés ponctuellement par les rejets urbains mais aussi de manière diffuse par l'agriculture et l'élevage. On constate que les apports diffus sont maintenant supérieurs aux apports ponctuels. Les engrais chimiques constituent la principale source d'azote dans le milieu. Il est toutefois possible de réorganiser la chaîne agro-alimentaire pour limiter ces lourds surplus d'azote. La faisabilité de l'exploration, à l'aide du modèle Seneque/Riverstrahler, de scénarios de modification de la gestion des eaux usées ou de pratiques agricoles dans le bassin versant a déjà été démontrée (Garnier et al., 2012). Celui-ci a été calibré sur l'ensemble des bassins versants de la Manche Est, et six scénarios (fig8), élaborés à l'issue des débats participatifs, ont été réalisés, qui ont permis d'évaluer leur impact sur les flux d'azote mais aussi de phosphore.

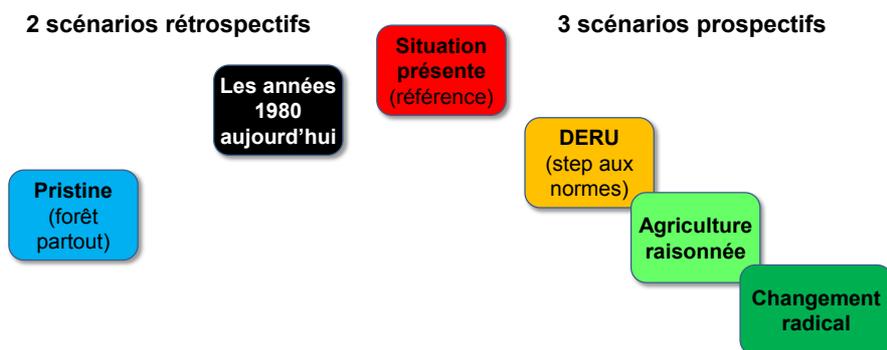


Figure 8. Les 6 scénarios considérés dans le projet FLAM

Autour d'un scénario de référence (situation actuelle), deux premiers scénarios rétrospectifs ont été réalisés afin d'évaluer les flux de nutriments dans des situations d'absence de réglementation (catastrophe) ou d'urbanisation et d'agriculture (pristine) ; puis trois scénarios prospectifs ont également été proposés afin d'évaluer l'impact sur les flux de nutriments, et notamment azotés, de (i) l'application généralisée de réglementation DERU concernant les stations d'épuration mais aussi (ii) d'une réorganisation de la chaîne agroalimentaire (de l'agriculture raisonnée à la généralisation de l'agriculture biologique). Dans la plupart des bassins versants, le scénario apportant les flux d'azote les plus importants est le « catastrophe » et celui apportant les flux les plus bas après le "pristine" est le "changement radical". Ces premiers résultats mettent clairement en évidence l'impact des réglementations en vigueur amenant à une limitation des flux azotés. L'absence de règle est catastrophique. Au contraire, la diminution des flux azotés arrivant en mer est très significative dans le cas d'une réorganisation profonde des pratiques agricoles et de la chaîne agro-alimentaire (figure 9), dont le coût économique n'a toutefois pas été évalué par le projet FLAM.

Le chaînage d'un modèle biogéochimique de bassin versant et d'un modèle de dynamique de l'écosystème marin a enfin permis de mieux appréhender l'impact de ces scénarios en mer. Dans un premier temps, le modèle d'écosystème marin, calibré sur les observations réalisées dans le cadre du REPHY, a permis de retrouver les grandes tendances passées des fortes efflorescences à *Pseudo-nitzschia* mais aussi leur localisation géographique à l'échelle de la Manche Est. Le modèle reproduit également la forte production d'acide domoïque en 2004, mais pas en 2011-2012. Dans un second temps, l'impact en mer de quatre scénarios (référence, catastrophe, pristine et

changement radical) a été évalué. Le cycle moyen d'abondance de *Pseudo-nitzschia* simulée dans les 4 scénarios montre une importante sensibilité aux régimes d'apports nutritifs, mais essentiellement en niveau global d'abondance, peu en terme de répartition sur l'année. Les fluctuations inter-annuelles sont qualitativement différentes lors de changements profonds des apports : alors que le scénario de changement radical ne modifie presque pas les biomasses de *Pseudo-nitzschia*, celles-ci se trouvent sévèrement diminuées sous le scénario "Pristine" (ce à quoi on pouvait s'attendre), mais aussi sous le scénario "catastrophe", ce qui n'était pas prévisible (figure 10). La production de toxine (acide domoïque) réagit aux divers scénarios très différemment de la biomasse. Les fluctuations inter-annuelles montrent une disparition des épisodes toxiques dans le scénario "Pristine" (ce à quoi on pouvait s'attendre), mais aussi dans le scénario de changement radical "LocOrgDem", ce qui laisserait penser qu'un ré-équilibre substantiel des pratiques agricoles sur les bassins versants serait à même de supprimer la toxicité des *Pseudo-nitzschia* en mer. Le "Retour aux années 80" cause par contre une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes toxiques (figure 11).

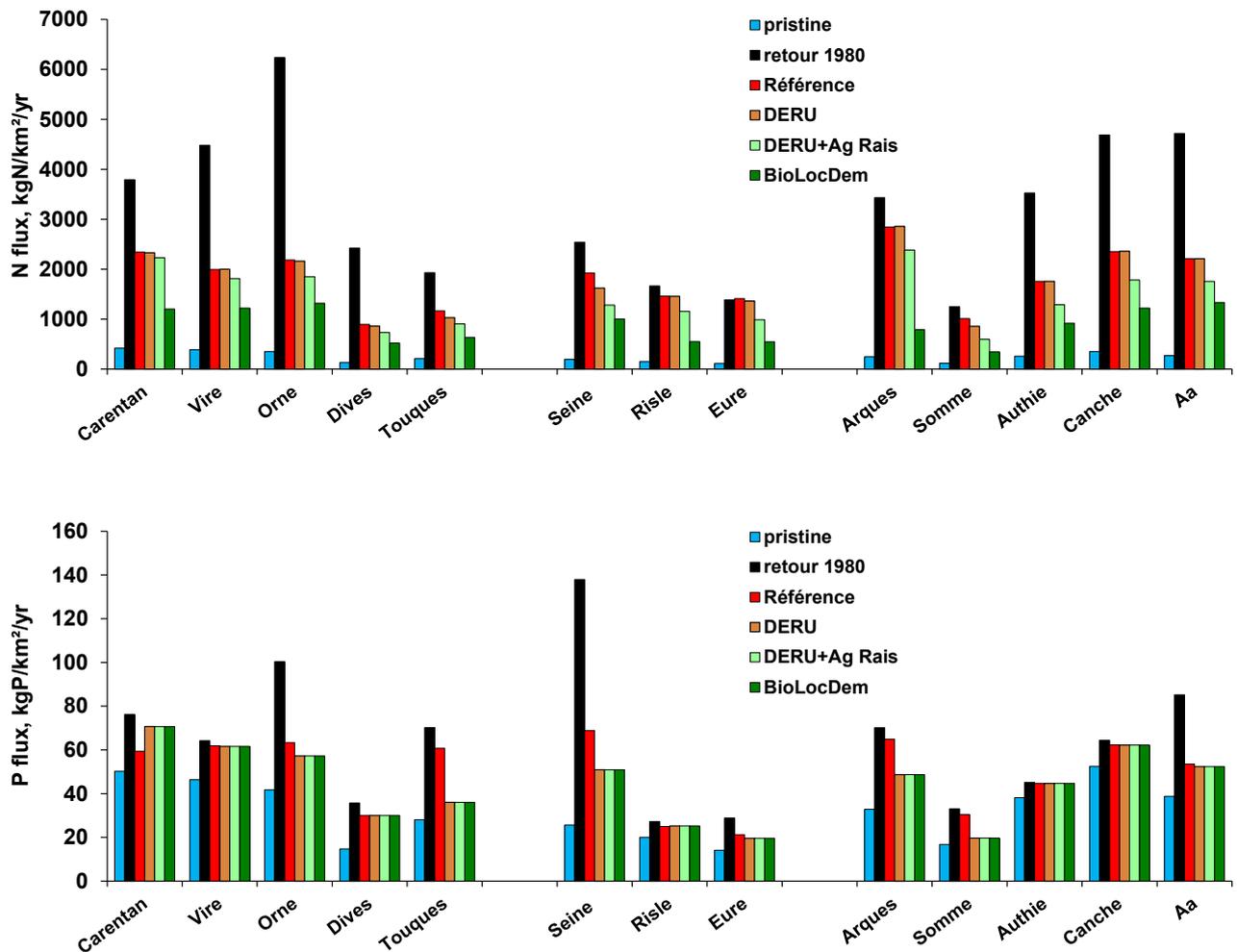


Figure 9. Flux d'azote et de phosphore délivrés en moyenne en Manche par les principaux fleuves du domaine FLAM, pour les différents scénarios testés.

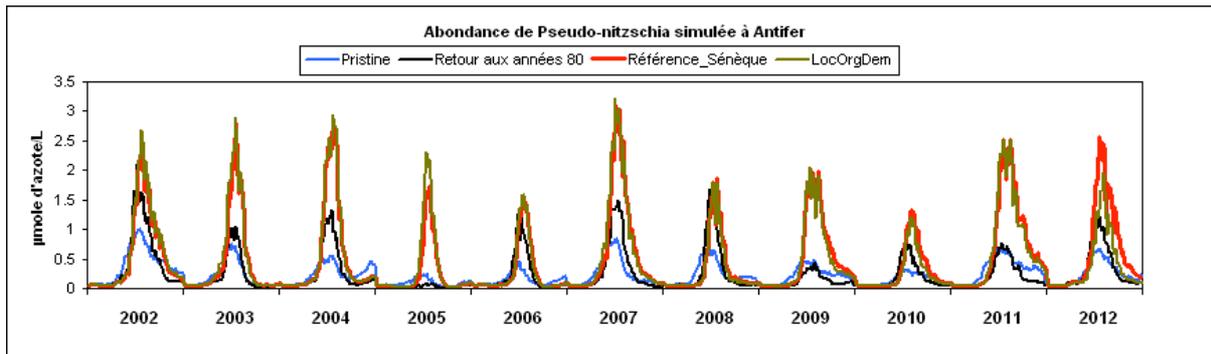


Figure 10. Comparaison des séries 2002-2012 de biomasse simulées à Antifer sous les 4 scénarios

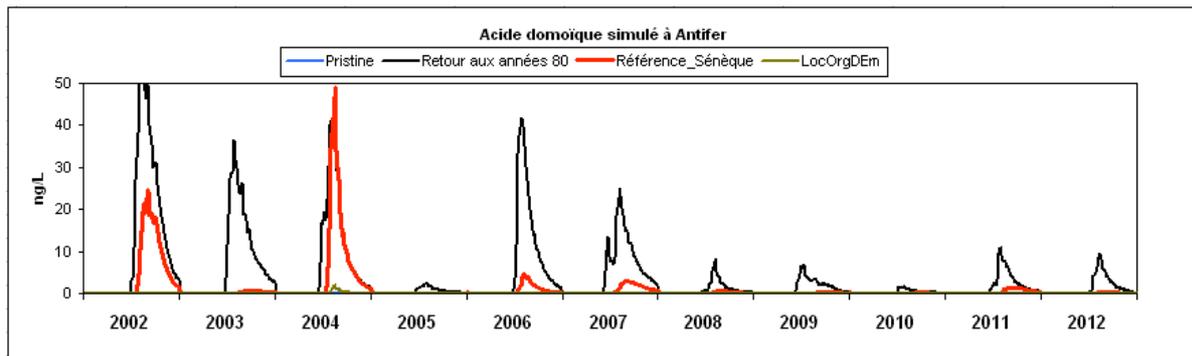


Figure 11. Comparaison des séries 2002-2012 d'acide domoïque dans l'eau simulées à Antifer sous les 4 scénarios

Bibliographie :

- Davidson K. and Fehling J., 2006. Modelling the influence of silicon and phosphorus limitation on the growth and toxicity of *Pseudo-nitzschia seriata*., *African Journal of Marine Sciences*, 28(2), 357-360.
- Billen, Gilles, Luis Lassaletta, and Josette Garnier. (2014) A Biogeochemical View of the Global Agro-Food System: Nitrogen Flows Associated with Protein Production, Consumption and Trade. *Global Food Security* 3–4 209-19.
- Garnier Josette, Le Gendre Romain, Passy Paul, Paris Francois, Billen Gilles, Callens Julie, Cugier Philippe, Tronquart Olivier, Romero Estela, Riou Philippe (2012). NEREIS (Nutrient Export Role on Eutrophication. Indicators and model Scenarios) - Rapport Seine-Aval.
- Nézan, E., Antoine, E., Fiant, L., Amzil, Z., Billard, C., 2006. Identification of *Pseudo-nitzschia australis* and *P. multiseriata* in the Bay of Seine. Was there a relation to presence of domoic acid in king scallops in autumn 2004? *Harmful Algae News*, 31, 1–3.
- Passy P, Le Gendre R, Garnier J, Cugier P, Callens J, Paris F, Billen G, Riou P, Romero E, (sous presse) Eutrophication modelling chain for improved management strategies to prevent algal blooms in the Seine Bight, *Marine Ecology Progress Series*.

La valorisation et les perspectives :

Le **processus de valorisation** est engagé. Pour information, des résultats issus des travaux / échantillonnages réalisés dans FLAM ont fait l'objet d'une valorisation spécifique pour un poster soumis, accepté et diffusé lors de la 16^{ième} conférence internationale sur les algues toxiques (ICHA) en Nouvelle-Zélande en 2014 (*Life cycle in Pseudo-nitzschia spp.: species-specific control of the induction of sexual reproduction Idir Issad, Maxine Thorel, Marina Montresor, Raffaele Siano, Pascal Claquin, Juliette Fauchot*). Une publication pour la revue *Harmful Algae* est actuellement en cours de finalisation sur ces résultats dans le cadre de la thèse de Maxine Thorel.

Par ailleurs, une partie du consortium scientifique du projet FLAM, forte de son expérience acquise, s'est retrouvée dans un nouveau projet financé par le GIP-SA. Il s'agit du projet RESET «Rôle de l'estuaire dans l'écologie territoriale de la Normandie – cycle des nutriments et système hydro-agro-alimentaire ». Très rapidement, tout en bénéficiant de l'environnement du projet FLAM et de ses résultats, un premier article a été soumis puis accepté. Le projet FLAM figure dans les remerciements.

Romero Estela, Le Gendre Romain, Garnier Josette, Billen Gilles, Fisson Cedric, Silvestre Marie, Riou Philippe (2016). Long-term water quality in the lower Seine: Lessons learned over 4 decades of monitoring. *Environmental Science & Policy*, 58, 141-154.

<http://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.016>

De plus, les scénarios élaborés dans FLAM ont par ailleurs fait l'objet d'une publication acceptée dans la revue DEMETER.

Billen Gilles, Le Noë Julia, Lassaletta Luis, Thieu Vincent, Anglade Juliette, Petit Léo, Garnier Josette (2016, acceptée). *Et si la France passait au régime « Bio, Local et Demitarrien » ? Un scénario radical d'autonomie protéique et azotée de l'agriculture et de l'élevage, et de sobriété alimentaire. Demeter.*

Le projet FLAM a également été présenté à deux séminaires :

Riou Philippe, Le Gendre Romain, Cugier Philippe, Menesguen Alain, Claquin Pascal, Garnier Josette, Billen Gilles, Vergne Antoine, FLAM : efflorescences algales toxiques : rôle des bassins versants. Séminaire LITEAU/MEDDT 21/22 novembre 2013 Boulogne/Mer

Riou Philippe, Schapira Mathilde., Le Gendre Romain, Menesguen Alain, Cugier Philippe, Fauchot Juliette, Claquin Pascal, Billen Gilles, Garnier Josette, Vergne Antoine, Mathieu Yves. 2014. FLAM : efflorescences algales toxiques : rôle des bassins versants. Pegaseas conference “Promoting effective Governance of the Channel Ecosystem”, 2-3 July 2014, Caen, France.

On peut noter également qu'au début de cette année des abstracts (pour des communications orales et/ou posters) ont été soumis à deux symposiums internationaux :

- OCEANEXT (1) (<https://oceanext.sciencesconf.org>) qui rassemblera début juin à Nantes des scientifiques internationaux de renom et des acteurs de champs de recherche pluridisciplinaires, spécialistes de l'exploitation durable des services écosystémiques et de la gouvernance des espaces littoraux et marins,
- ECSA-56 (2) Coastal System In Transition *Coastal systems in transition from a 'natural' to an 'anthropogenically modified' state* qui se déroulera début septembre à Breme en Allemagne (<http://www.estuarinecoastalconference.com>)

Le symposium (1) a d'ores et déjà répondu positivement en proposant aux membres du consortium FLAM concernés une présentation orale (horaire et timing en cours de finalisation) et la réponse pour le colloque (2) est attendue prochainement.

Enfin, des réflexions sont toujours en cours sur des thèmes de publications que le consortium souhaite présenter sous un angle novateur. Le développement et la mise au point du module *Pseudo-nitzschia* au sein du code numérique ECOMARS3D devraient pouvoir faire l'objet d'un article. De plus, comme précisé *supra*, un article est en cours de rédaction sur le volet éco-physiologique de cette espèce toxique (revue *Harmful Algae*). Les scénarios et le calcul de leurs effets dans les bassins versant vont aussi faire l'objet d'une publication internationale, celle de Demeter (citée ci-dessus) étant destinée à public plus limité (francophone et du secteur agricole). Enfin, la pro-activité de l'équipe de MP va aider à diffuser très largement les résultats des différents exercices de sciences participatives au delà de la première valorisation réalisées avec les vidéos des travaux et des acteurs déjà en ligne notamment sur le site web du LERN et sur internet :

Liste de lecture :

<https://www.youtube.com/playlist?list=PL--woZ1dDUPU6Xf7BzE7gzzev5OKYlcvr>

Résumé d'ensemble: <https://youtu.be/R9ThWQNReKc>

Interviews et interventions :

- <https://youtu.be/f8WePDrlIEc>
- <https://youtu.be/RfuQT8PuZwA>
- <https://youtu.be/oH-jYozWaXg>
- <https://youtu.be/bkk6O3mPZBM>
- <https://youtu.be/tulDfeeswhg>
- <https://youtu.be/D81YQ7PURIE>
- <https://youtu.be/xGRfgCvEEkI>
- <https://youtu.be/nWcSqDw6f-Q>
- <https://youtu.be/L3L0HEZrA7Y>

Par ailleurs, la mise en œuvre des résultats des différents scénarios au sein d'un plan d'action doit être réfléchi et concertée. En effet, le format de gouvernance du projet FLAM n'avait pas vocation à poursuivre vers la définition des mesures à mettre en place de manière « directe ». Le projet FLAM constituait un volet limité de ce qui est abordé dans le cadre de l'élaboration d'un projet SDAGE et de son programme de mesures (PDM). Pour la problématique liée spécifiquement à l'enrichissement en sels nutritifs et à l'eutrophisation, plusieurs enjeux sont confrontés, tels que :

- les objectifs de réduction des flux en tant que tels (convention OSPAR)
- la réduction de la biomasse chlorophyllienne dans certaines zones côtières (ex Est Baie de Seine), en lien avec la qualité de l'eau/DCE (espèces nuisibles et toxiques)
- la réduction des blooms toxiques (dont *Pseudo-nitzschia*) et des impacts sanitaires
- la qualité des eaux continentales superficielles et souterraines, en réponse aux directives européennes et les autres politiques (Directive Nitrates...).

Si le projet FLAM abordait le 3^{ème} point spécifiquement, il est important de préciser que les acteurs concernés par l'ensemble des enjeux cités ci-dessus ont été invités aux ateliers du futur. Pour une prise en compte et une application effective des recommandations (scenarios) issues de FLAM dans un SDAGE et son PDM, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des enjeux et de les confronter. A ce titre, un **programme transversal** a été mis en place au sein de l'AESN sur la thématique « Eutrophisation », comme précisé *infra*, afin de préparer au mieux le prochain SDAGE et les résultats de FLAM y seront mobilisés.

En effet, ce projet transversal a pour but d'identifier les pressions à l'origine de l'eutrophisation continentale, estuarienne, littorale et marine et de proposer des mesures de réduction efficaces et partagées. Les enjeux de préservation et de restauration des écosystèmes marins sont désormais au cœur des politiques environnementales comme l'illustrent notamment la mise en œuvre récente de la DCSMM, l'intégration des problématiques marines dans la loi Biodiversité ou, plus anciennement, la prise en compte des littoraux et des estuaires dans la DCE. L'intégration d'un défi dédié au milieu marin (défi 4) dans le SDAGE 2016-2021 Seine Normandie matérialise la prise en compte de ces enjeux dans les outils de mise en œuvre des politiques publiques. Parmi les enjeux majeurs traités dans le SDAGE, celui de l'eutrophisation littorale fait l'objet d'un développement méthodologique particulier, avec l'identification de dispositions spécifiques. Comme cela est le cas pour bon nombre de pollutions touchant le littoral, cette thématique de l'eutrophisation littorale interpelle très directement les acteurs du milieu continental et plus spécifiquement « les acteurs » intervenant sur les cycles de l'azote et du phosphore.

Le projet FLAM est l'exemple d'une dynamique nécessaire entre les scientifiques et les gestionnaires. Jusqu'à présent, les travaux au sein de l'AESN sur les facteurs d'influence et les conséquences de l'eutrophisation sont menés via une approche compartimentée par service et/ou milieu, avec des objectifs propres et peu ou pas coordonnés. Les travaux engagés dans le cadre de FLAM ont montré la nécessité d'intégrer la réflexion avec les acteurs dans une dynamique amont-aval et vont contribuer à alimenter certains modules du projet de l'AESN : module 1 (bilan des connaissances) et module 4 (Actions de réduction des flux), notamment dans l'arbre décisionnel des actions inventoriées traitant de l'acceptabilité/efficacité/efficacités des mesures. En effet, les questions de gouvernance et d'impacts économiques et sanitaires soulevées en COLIMER doivent nourrir la réflexion et les axes de travail de l'AESN dans le cadre de ce projet.

D'autre part, un projet scientifique tel que FLAM ne peut prétendre sur sa durée de 3 ans déboucher sur des prises de décisions immédiates. En effet, l'association des acteurs, l'analyse des retours d'expérience, la prise de conscience sociale et économique, et la mise en œuvre d'actions (chiffrées et datées) sont des processus longs et itératifs, qui nécessitent des mois, voire des années de travail. Les plans de gestion des Agences de l'eau, établis sur 6 ans, en collaboration avec les services de l'état (la DRIEE sur le bassin Seine-Normandie) et discutés au sein des parlements de l'eau que sont les Comités de Bassin, participent à ce chantier. La prise de conscience évolutive des acteurs (discours de l'agriculteur notamment) mise en avant lors de l'analyse de la phase de concertation permet de souligner pour l'AESN la nécessité de réitérer l'exercice de sciences participatives, sur un plan de gestion dans son ensemble, et de manière rapprochée dans le temps, afin de favoriser au maximum l'adhésion et la prise de conscience/responsabilité de chacun et du plus grand nombre.

Sur un volet purement scientifique (avec des perspectives de gestion), le travail de compréhension de la physiologie de *Pseudo-nitzschia* et les mécanismes de production des toxines restent des priorités dans nos réflexions. C'est pour cette raison que le projet *PSEUDOPHY* vient de commencer en bénéficiant de l'expérience acquise par les équipes du consortium FLAM. En effet, il vise à caractériser (par expérimentation en laboratoire) la diversité écophysiological au sein du genre *Pseudo-nitzschia* en développant différents indices physiologiques (taux de croissance, paramètres cinétiques d'absorption des sels nutritifs, taux de production d'acide domoïque...). Ce projet est financé par l'AESN mais aussi grâce à une bourse doctorale de l'EdNBISE (école doctorale normande), l'objectif pour l'AESN étant double : ces développements permettront par la suite d'appréhender plus justement l'apparition des blooms de *Pseudo-nitzschia* en mer et de disposer d'une chaîne de modélisation amont-aval, afin de mettre en place des mesures précises de réduction des flux.

Par ailleurs, comme indiqué *supra*, le projet RESET bénéficie de l'environnement tant partenarial que scientifique du projet FLAM.

Enfin, afin de développer un réseau de suivi en routine de l'acide domoïque dans l'eau pour mieux appréhender les périodes d'apparition des blooms, l'AESN a financé un projet sur la période 2014-2016 (DISCCO : Détection des risques de Contamination des coquilles Saint Jacques en Baie de Seine). Ce projet a fait suite au projet TAPAS et aux 3 crises majeures d'ASP lié à l'acide domoïque produit par *Pseudo-nitzschia* en Baie de Seine (en 2004, 2011 et 2012) ainsi qu'à la nécessité révélée dans FLAM de continuer à acquérir de la donnée pour la compréhension des évolutions annuelles et interannuelles et pour la validation des modèles. Ce projet est aujourd'hui en cours de finalisation et l'intérêt de suivre l'acide domoïque dans l'eau sera déterminé lors de la mise en place du programme de surveillance 2017.