

Résumé

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) 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 dans 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, 2011 et 2012 (données Ifremer), entraînant la fermeture partielle, voire totale, de la pêche de coquille Saint Jacques en Baie de Seine pendant plusieurs mois. Durant ces trois 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* et aux travaux expérimentaux, 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. La présence de cette algue en grande quantité est à mettre en relation avec un excès d'azote par rapport à la silice et au phosphore. Nous sommes bien dans un cas avéré de dystrophie. Les travaux *in vitro* ont permis la mise en évidence d'optima de croissance en fonction de la lumière et de la température. Ceux-ci 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. Ces résultats *in situ* et *in vitro* ont alimenté le modèle écologique ECO-MARS3D. En effet, ceux-ci ont permis d'affiner le module spécifique qui simule l'évolution des efflorescences de phytoplancton et notamment celle de *Pseudo-nitzschia* spp. en fonction des paramètres environnementaux. Le processus de production de l'acide domoïque, implémenté dans le modèle, est fondé sur le quota cellulaire en silicium.

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. 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 (divisés par 3). L'azote et le phosphore sont apportés par les rejets ponctuels urbains mais aussi de manière diffuse par l'agriculture et l'élevage. On constate d'ailleurs que ces 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 (étude GIP SA - NEREIS). Pour ce projet, le modèle a été calibré sur l'ensemble des bassins versants de la Manche Est.

FLAM est un projet de science participative, par conséquent, comme prévu, deux ateliers dits « du futur » 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 objectifs 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. Ainsi six scénarios ont été co-construits et ont permis d'évaluer leur impact sur les flux azotés notamment mais aussi sur le phosphore. Deux scénarios rétrospectifs ont été réalisés afin d'évaluer les flux de nutriments dans des situations d'absence de réglementation (scénario catastrophe) ou d'urbanisation et d'agriculture (scénario pristine). En sus d'un scénario dit de référence (scénario situation actuelle), trois scénarios prospectifs sont également proposés afin d'évaluer l'impact sur les flux de nutriments, et notamment azotés, (i) de l'application généralisée de réglementation DERU concernant les stations d'épuration mais aussi (ii) du passage de l'agriculture traditionnelle à une agriculture raisonnée et enfin (iii) d'une réorganisation complète de la chaîne agroalimentaire (changement radical). Dans la plupart des bassins versants, et comme on pouvait s'y attendre, 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. Une réorganisation de la chaîne agro-alimentaire apporte une diminution très significative des flux azotés arrivant en mer ; mais le projet n'a pas évalué les coûts économiques associés.

Le chaînage d'un modèle biogéochimique de bassin versant et d'un modèle de dynamique de l'écosystème marin a 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, reproduit les grandes tendances passées des fortes efflorescences à *Pseudo-nitzschia*, mais aussi leur localisation géographique à l'échelle de la Manche Est. Il reproduit également la forte production d'acide domoïque en 2004, mais moins en 2011-2012, et la faible toxicité les autres années. Le modèle d'écosystème a ensuite été utilisé pour évaluer l'impact en mer de quatre scénarios (référence, catastrophe, pristine et changement radical). 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 distribution 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. 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, 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.

Un deuxième atelier de débats participatifs a été organisé en octobre 2015 afin de présenter à tous les acteurs l'exploration des conséquences de ces scénarios par les deux types de modèles.

Mots-clés : Microalgue toxique, *Pseudo-nitzschia spp.*, bassins versants, flux sels nutritifs, scénarios, écosystème marin, modélisation, science participative

Abstract

The French coast of the Eastern Channel, between Normandie and Picardie, is under the influence of the Seine plume and its unbalanced load of nutrients, which can trigger local coastal eutrophication. At the same time, several periods of toxic phytoplankton blooms are observed affecting fisheries and shellfish activities.

Pseudo-nitzschia is a diatom microalga. It is a cosmopolitan genus observed regularly along the coast of the Eastern Channel (cf French microphytoplankton monitoring network – REPHY) and particularly in the Seine bay. In this genus, some species produce a phycotoxin (domoic acid) of ASP type (Amnesic shellfish poisoning). This toxin can be found in the food chain. Particularly, shellfishes, which filter toxic phytoplankton, can stock the toxin in the digestive gland (hepatopancreas). This toxin is not harmful for the shellfish but for the human population.

Two ASP toxic events that occurred between 2004 and 2011-2012 in the eastern Channel affected the scallop fishery in the Bay of Seine and induced the partial or total closure of the fisheries. During these events, the species *Pseudo-nitzschia australis* was systematically observed in the water samples. This species is 150 times more toxic than the other diatoms in the same genus.

All the data and results acquired during the *in situ* sampling survey and experimental work in the laboratory give us information about the *Pseudo-nitzschia* ecophysiology, especially for the principal species observed in the French coast of the eastern Channel. In fact, this diatom is observed principally in the Seine plume. The presence of the microphytoplankton is concomitant to a dissolved inorganic nitrogen excess with regards to the dissolved silicon or phosphorus. The influence of temperature, light intensity and nutrient (N, P and Si) limitations on the physiology (growth rate and photosynthetic parameters) of *Pseudo-nitzschia* have been studied during laboratory experiments on cultures of the different isolated species. These experiments showed the relation between siliceous deficiency and domoic acid production. All these results confirm the potential impact of the nutrient flux on phytoplankton bloom. These informations have been introduced in the ecological ECOMARS3D model. The domoic acid production has been linked to the cellular quota of silicon.

Human activities (agricultural and urban) in this region have a direct effect on the functioning of the coastal marine ecosystem. Indeed, nitrogen excess is potentially accountable for marine eutrophication. Concerning the phosphorus, the fluxes have reduced significantly over the two last decades. Nitrogen and Phosphorus are brought to the river by the point-sources but also by the agricultural and breeding diffused sources. These

diffused loadings are now more significant than the point-source ones. Chemical fertilizers are the principal source of nitrogen in the ecosystem. Nevertheless, it is possible to reduce these nitrogen fluxes by reorganizing the agricultural-food chain and limiting over-supply. To test this re-organisation and different scenarios, the River-Strahler mechanistic biogeochemical model is used.

FLAM was a participative science project; consequently, two workshops “atelier du futur” were organized in the second part of the project. The first was planned in October 2014 in the head office of the Regional Basse Normandie Council and the objective of this first meeting was to present our scientific strategy and to build with all the actors of the watersheds (Administration, local authorities, association, professional of fisheries and shellfish culture) the different scenarios of agricultural practices modification/evolution. The scenarios were planned to improve the coastal protection management. Six scenarios are set up to test different situations of watershed management. Two retrospective scenarios are set up to test the impact of situations (i) without any load regulation (the “catastrophe” scenario) and (ii) without agriculture and urbanization (the “pristine” scenario). Furthermore, four prospective scenarios are set up to evaluate the impact of the application of the European Directive relative to upgrading WWTPs and different propositions of implementing organic farming (reasoned or biological agriculture) in all the watersheds (the "radical change" scenario). The “catastrophe” scenario, ie without regulations, is the worst situation producing the highest nitrogen fluxes. On the other hand, the best scenario with the lowest nitrogen load after the pristine one is the "radical change" one. These first results enable us to appreciate the beneficial impact of the regulations. So, the agricultural-food chain reorganization in the watershed basin is able to go back to very low nitrogen loadings to the sea, but the associated economical cost has not been assessed by the project.

The coupling of a watershed model and a marine ecosystem model enables a better understanding of the impact of scenarios at sea. The marine ecosystem model forced by present nutrient loads is first compared to the REPHY observations. This simulation reproduced the trends of *Pseudo-nitzschia* bloom during the last decade in the Eastern Channel. Moreover, it points 2004 as the year of maximum acid domoic production. The impacts on the marine ecosystem of four scenarios (reference, catastrophe, pristine and radical change) have been tested. The *Pseudo-nitzschia* abundance cycle simulated in the four scenarios shows an important sensitivity to the nutrients fluxes, mainly over the global abundance level, not so much over the seasonal pattern. The between-years fluctuations are different following significant changes of loads: if the "radical change" scenario does not modify the *Pseudo-nitzschia* biomass, the Pristine and Catastrophe scenarios change it drastically. The toxin production (domoic acid) changes differently according to the scenario. The toxicity disappears during the Pristine scenario, but also under the “radical change” scenario,. On the contrary, the toxin production and the number of toxic events increase with the "catastrophe" scenario.

In a second meeting, organized in October 2015 in Caen University, all results were presented to the same actors.

Keywords: toxic microalgae, *Pseudo-nitzschia*, watersheds, nutrient load, scenarios, marine ecosystem, modelling, participative science.