

Crédit photo: Bay of Biscay in Bloom, May 16 2004, © NASA

# Eutrophisation des milieux marins

## Une étude statistique

Redigé par:  
Thomas Dupouy

<b>1. Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2. Définition de l'eutrophisation</b>	<b>06</b>
2.1 Déclenchement des efflorescences alguales	<b>08</b>
2.2 Les nutriments	<b>09</b>
2.3 La lumière	<b>09</b>
2.4 La température	<b>09</b>
2.5 Le temps de résidence de l'eau	<b>10</b>
<b>3. Directive Cadre sur l'Eau</b>	<b>11</b>
3.1 REPHY	<b>12</b>
3.2 Copernicus	<b>14</b>
<b>4. Analyse statistique</b>	<b>15</b>
4.1 Des données corrélées?	<b>17</b>
4.2 Incidence des variable sur la quantité de chlorophylle-a	<b>18</b>
4.3 Une période de retour courte	<b>19</b>
<b>5. Conclusion</b>	<b>20</b>
<b>6. Références</b>	<b>22</b>
<b>7. Annexe 1 : récupération des données Copernicus</b>	<b>24</b>

# 1. Introduction

Les écosystèmes aquatiques sont des systèmes complexes, dont le fonctionnement est régi par des équilibres dynamiques, sur lesquels l'activité humaine produit des perturbations. L'eutrophisation compte parmi les altérations les plus courantes des eaux continentales et marines. Déclenchés par des apports excessifs en nutriments, les phénomènes d'eutrophisation se traduisent par une productivité exacerbée des écosystèmes aquatiques. Les manifestations les plus connues sont les efflorescences de cyanobactéries toxiques dans les lacs et les cours d'eau, et les proliférations de macroalgues vertes dans les zones côtières. Ces phénomènes génèrent des perturbations majeures des écosystèmes aquatiques et ont des impacts sur les biens et les services associés, sur les activités économiques qui leur sont liées, et sur la santé de l'homme. L'intensification de l'agriculture et l'urbanisation sont identifiées comme les principales contributions de ces apports excessifs de nutriments aux écosystèmes aquatiques.

Le présent document propose une analyse statistique sur le thème de l'eutrophisation des côtes métropolitaines. La première partie détaille ce qu'est le phénomène de l'eutrophisation, ses

causes et ses effets. La seconde partie présente le cadre réglementaire appliqué en Europe depuis les années 2000, qui permet l'apport des source des données utilisées et la classification en districts et masses d'eau. La troisième partie va consister en la description de ces variables ; puis en l'analyse de la réaction aux changement de la quantité de chlorophylle-a en utilisant le modèle du Vecteur Autoregressif; et enfin en l'estimation d'une période de retour des blooms de phytoplancton par le modèle des Valeurs Extrêmes Généralisée.

## **2. Définition de l'eutrophisation**



L'eutrophisation des écosystèmes aquatiques est une succession de processus biologiques enclenchés en réponse à un apport excessif de nutriments (azote, phosphore) dans les eaux de surface qui perturbe les équilibres naturels des écosystèmes aquatiques.

La biomasse générée, composée en majeure partie d'éléments de grande taille peu consommables (algues coloniales ou filamenteuses parfois toxique, cyanobactéries) n'est que partiellement recyclable via le réseau trophique : une grande partie va sédimenter. L'augmentation de la matière organique sédimentée favorise la croissance des bactéries hétérotrophes qui consomment de l'oxygène en dégradant les composés organiques. Une charge excessive et une température élevée (durant l'été en région tempérée) aboutissent à une désoxygénation des eaux profondes et à une minéralisation partielle des substances organiques. Si la couche anoxique est assez épaisse, la désoxygénation conduit à une crise de fonctionnement, ou dystrophie, caractérisée par la production de méthane et d'hydrogène sulfuré avec prolifération de bactéries phototropes anoxygéniques.

Une concentration en oxygène dissous approximativement inférieure à 30% de saturation est appelée hypoxie car à ces concentrations des effets sont observés sur le métabolisme et le comportement des invertébrés et des poissons entraînant une augmentation de la mortalité ou une baisse de la croissance. Lorsque la concentration en oxygène est nulle, le milieu est en anoxie, et des mortalités importantes de la faune marine sont observées. L'appauvrissement en oxygène affecte la physiologie des organismes, la biodiversité mais également les interactions entre les organismes telles que les relations prédateurs / proie ce qui impacte de manière significative les réseaux trophiques.

L'eutrophisation apparaît le plus souvent aux yeux du grand public comme un problème environnemental très localisé et à travers des phénomènes très médiatisés comme les marées vertes sur les côtes bretonnes. Or les facteurs qui contrôlent l'eutrophisation ne s'exercent pas qu'à une échelle locale et de manière ponctuelle. Les processus sont contrôlés par des facteurs s'exerçant également à de larges échelles spatio-temporelles. Les nutriments arrivant en zone côtière peuvent en effet provenir de bassins versants amont parfois éloignés de plusieurs centaines de kilomètres, avant d'être transportés et dilués en mer sur des centaines de kilomètres. Ces apports anthropiques, issus principalement de rejets directs d'effluents (domestiques, industriels et agricoles), de l'écoulement d'eaux de ruissellement contaminées après leur passage sur des surfaces agricoles, des activités de pêche et des retombées atmosphériques, conduisent aux phénomènes de pollution des eaux marines côtières.



Mort de milliers de poissons dans la rivière de la Seiche, d'Essé à Amanlis, Septembre 2017 | © OUEST-FRANCE.



Pollution au phosphore à Lille | © Wiki / F. lamiot.

### 2.1 Déclenchement des efflorescences algales

En milieu marin, en fonction du degré d'apport en nutriments, les successions végétales peuvent être décrites en quatre phases. Au cours de la phase I, la disponibilité nutritive du milieu est faible et les macrophytes pérennes benthiques comme les herbiers marins ou d'autres phanérogames spécifiques des fonds meubles, ainsi que les macroalgues pérennes de substrat dur dominant. En phase II, lorsque les nutriments et la turbidité de l'eau augmentent, les espèces épiphytes prolifèrent de même que les brouteurs de macrophytes au détriment de ces dernières. En phase III, le milieu évolue vers un état eutrophe, les macroalgues opportunistes en dérive et/ou le phytoplancton prolifèrent alors, provoquant une chute de la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau. Les épiphytes s'effondrent et les macrophytes benthiques disparaissent. La phase IV correspond au stade ultime de l'eutrophisation, le phytoplancton constitue le producteur primaire dominant et forme d'importants dépôts organiques notamment dans les estuaires ou les baies confinées à faible hydrodynamisme. La dégradation de la matière organique algale par l'activité bactérienne est alors stimulée induisant un appauvrissement en oxygène du milieu jusqu'à une possible hypoxie.



Le menhir de Penglaouic à marée basse, Juin 18, 2014 | © Moreau.henri.



## 2.2 Les nutriments

Les organismes photosynthétiques comme les algues et le phytoplancton ont besoin pour leur croissance de nutriments. Le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le soufre (S) sont des macronutriments considérés comme essentiels chez les végétaux au sens large du terme. Ce sont les teneurs en nutriments qui agissent comme facteur limitant de la prolifération si les conditions de transparence de l'eau et de luminosité sont optimum. Par exemple, dans le panache de la Seine et en baie de Vilaine, l'élément limitant au printemps à proximité de l'embouchure est le phosphore, tandis que plus au large, l'azote devient limitant, surtout en été. Les ulves, responsables de nombreuses marées vertes, ont la capacité d'utiliser plusieurs formes de l'azote comme les nitrates ou l'ammonium.

### Loi du minimum de Von Liebig

«Growth of plant is depend on the minimum amount foodstuff presented»

Cette loi fut développée par l'agronome von Liebig dans les années 1840.

Initialement appliquée aux végétaux supérieurs, elle énonce que l'élément limitant est l'élément présent à la plus faible teneur qui en fonction des besoins de la plante limitera sa croissance, si tous les autres facteurs sont optimaux. Ainsi le rendement d'une culture est limité par cet élément limitant dont l'apport, sous forme d'engrais minéral, permet d'accroître les rendements (N, P, K etc). Ces travaux sont à la base de l'agronomie moderne et de l'agriculture intensive développée au XXème siècle et sont très fréquemment généralisés au fonctionnement des écosystèmes aquatiques.

## 2.3 La lumière

Les organismes photosynthétiques ont besoin de la lumière, qui leur fournit l'énergie nécessaire à la production primaire. Le long du continuum terre-mer, les zones fréquemment soumises à la remise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau, comme les estuaires, sont des zones où le manque de lumière limite le développement des producteurs primaires. De manière générale, le phytoplancton, les plantes et les algues flottantes sont avantagés pour l'accès à la lumière par rapport aux végétaux benthiques. Le développement d'organismes photosynthétiques fixés, dérivant près du fond, ou vivant en épibiose ne se fera ainsi principalement que dans les eaux peu profondes et claires, comme par exemple les eaux calmes des petits cours d'eau non ombragés, les cours d'eau et les lacs peu profonds, les zones côtières. Les eaux de surface du plateau continental, des eaux marines, les eaux superficielles des lacs profonds en période de stratification thermique permettent, quant à elles, le développement du phytoplancton et des plantes et algues flottantes. Lorsque l'eau est turbide, comme dans une majorité d'estuaires européens, les effets d'une forte concentration en nutriment peuvent parfois passer inaperçus car ils ne sont pas accompagnés de forte production phytoplanctonique. Dans ce cas, les manifestations de l'eutrophisation sont souvent exportées vers la zone côtière adjacente dans le panache estuarien.

## 2.4 La température

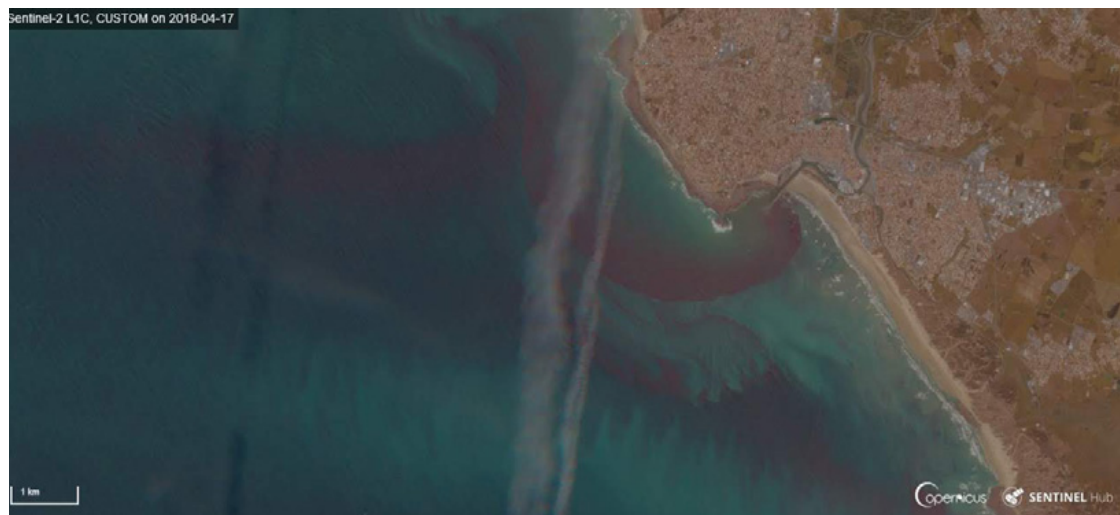
Toutes les activités biologiques sont stimulées par une augmentation de la température. Le développement cellulaire, les activités photosynthétiques et les processus de respiration n'échappent pas à la règle. De plus, l'augmentation de la température de l'eau entraîne une diminution de la concentration de saturation de l'eau en oxygène dissous qui favorise l'apparition de conditions anoxiques. C'est pourquoi les efflorescences algales et les phases d'anoxie se produisent principalement au printemps et en été, lorsque les températures sont élevées

### Rapport de Redfield

Redfield et ses collaborateurs ont mis en évidence dès 1934 qu'il existait un rapport relativement constant entre l'azote, le phosphore l'oxygène et le carbone dans les océans et dans le plancton. Ces rapports résultent des équilibres entre les grands cycles biogéochimiques. Les rapports de Redfield représentent ainsi en première approximation la composition de la matière organique océanique. Les valeurs admises à l'heure actuelle sont :  $O/C/N/P = 172/106/16/1$ , ce qui signifie que pour un atome de phosphore utilisé lors de la photosynthèse, 16 atomes d'azote et 106 atomes de carbone sont consommés alors que 172 atomes d'oxygène sont produits (Redfield 1958).

## 2.5 Le temps de résidence de l'eau

Le temps de résidence de l'eau dans un écosystème aquatique ou dans une partie de celui-ci conditionne le développement des proliférations algales. En effet, plus le temps de résidence de l'eau est long, moins vite est évacué le plancton formé, et plus les échanges entre les organismes photosynthétiques et les nutriments dissous sont importants, augmentant potentiellement le risque d'eutrophisation. En milieu marin, il en est ainsi pour les anses, les fonds de baie, les vasières de décantation en bordure d'estuaire ou sur de grands estrans rectilignes lorsqu'ils sont abrités par un chapelet d'îles, comme par exemple les Frises hollandaise et allemande. La faible pente de ces milieux s'accompagne d'une très faible vitesse du courant, générant un temps de résidence des eaux long. Le va-et-vient des marées n'a dans ces cas qu'un impact mineur sur ce temps de résidence des eaux. A l'inverse, les baies naturellement reliées à l'océan par un goulet étroit, telles que la rade de Brest et le golfe du Morbihan en Bretagne par exemple, génèrent d'intenses courants liés à la marée qui diluent rapidement les apports provenant des bassins-versants et les éloignent vers la haute mer.



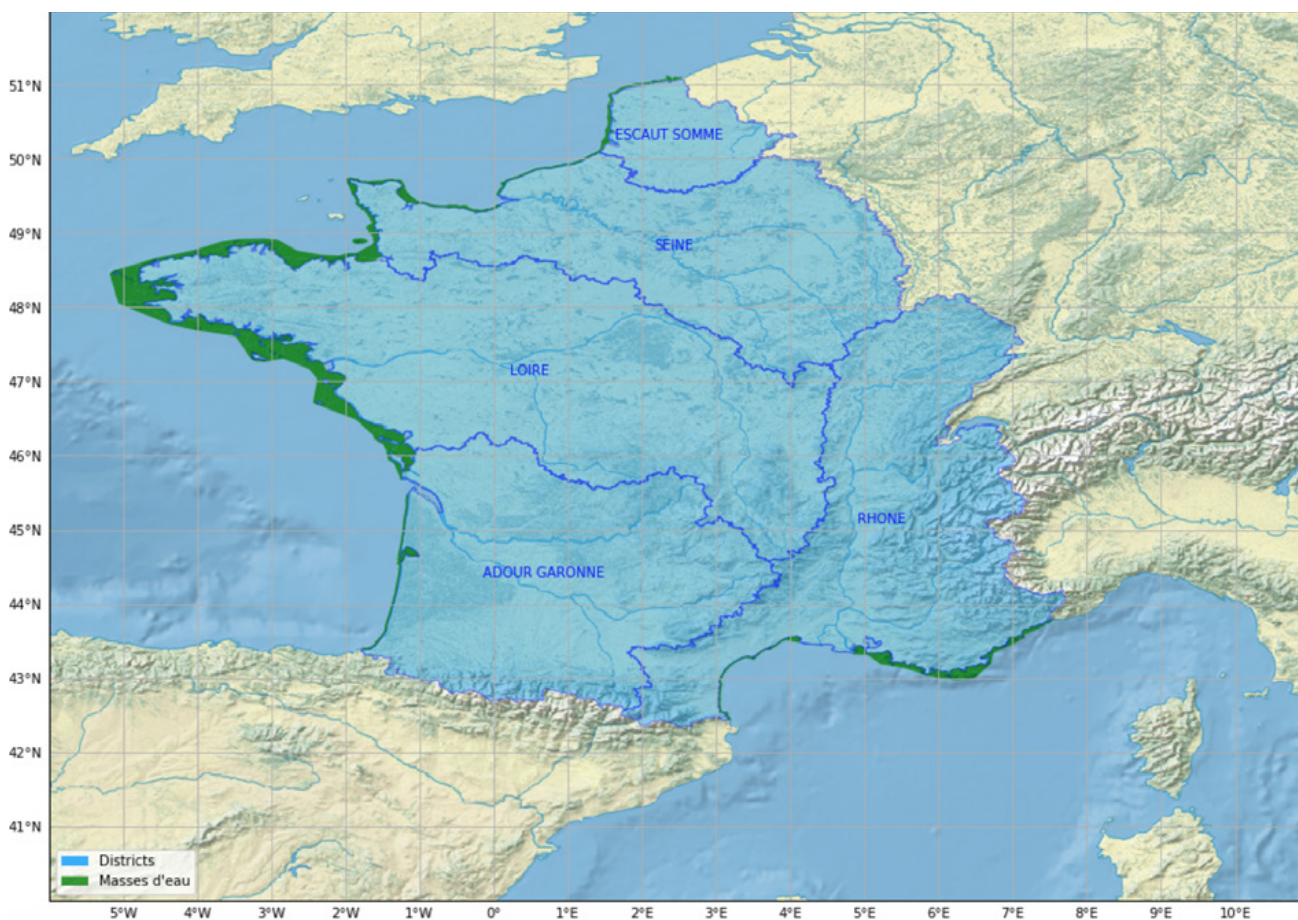
Première efflorescence signalée en Vendée le 17 avril 2018 via le site Phenomer | © ESA/Sentinel2.

### **3. Directive Cadre sur l'Eau**

La directive européenne 2000/60/CE du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dite directive cadre sur l'eau ou DCE, a pour objet d'établir un cadre pour la protection des eaux intérieures de surface, des eaux de transition, des eaux côtières et des eaux souterraines (article premier de la directive). Ce cadre doit permettre de protéger toutes les formes d'eau, de réduire les pollutions, d'améliorer l'état des écosystèmes aquatiques et d'assurer un approvisionnement durable en eau.

La DCE impose une méthode de travail commune aux Etats qui repose sur plusieurs instruments : une analyse des caractéristiques de chaque bassin hydrographique afin d'identifier les problématiques à traiter, un plan de gestion pour chaque bassin hydrographique fixant les objectifs environnementaux, un programme de mesures définissant des actions permettant d'atteindre ces objectifs, et un programme de surveillance pour assurer le suivi.

Une masse d'eau côtière est une partie distincte et significative des eaux de surface situées entre la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales et une distance d'un mille marin. Dans le cadre de la DCE, cette unité permet de définir les objectifs environnementaux, d'évaluer l'état des milieux et ultérieurement de vérifier l'atteinte de ces objectifs.



Districts et masses d'eau DCE.

### 3.1 REPHY

Le Réseau d'observation et de surveillance du Phytoplancton et de l'HYdrologie dans les eaux littorales (REPHY) s'inscrit dans un axe scientifique prioritaire de l'Ifremer en assurant le suivi de la dynamique des populations phytoplanctoniques et des conditions hydrologiques afférentes. Il s'agit du principal observatoire français du phytoplancton marin, avec 250 points de prélèvement eau, et 300 points de prélèvement coquillages couvrant le littoral métropolitain et celui des trois DOMs Martinique, Guadeloupe et Réunion.

Il a pour objectifs :



-D'observer l'ensemble des espèces phytoplanctoniques des eaux côtières, et recenser les événements tels que les eaux colorées, les efflorescences exceptionnelles et les proliférations d'espèces toxiques ou nuisibles pour la faune marine.

-De surveiller plus particulièrement les espèces produisant des toxines dangereuses pour les consommateurs de coquillages.

Les analyses sont effectuées par les laboratoires départementaux vétérinaires agréés, qui sont encadrés par le Laboratoire National de Référence, de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments Les masses d'eau côtière ont été élaborée par les travaux de l'Ifremer pour les besoins de la DCE.

Code	Libellé	Description	Unité
CHLOROA	Chlorophylle-a	La chlorophylle a est la principale forme de chlorophylle présente chez les organismes qui mettent en œuvre la photosynthèse. La quantité de chlorophylle-a est souvent utilisé comme proxy de la biomasse algale et les recouvrements d'espèces algales.	µg.L-1
PHOSPHATES	Phosphate	Les phosphates sont utilisés dans l'agriculture et le jardinage comme engrais pour fournir aux plantes une source de phosphore.	µmol.L-1
NITRATES	Nitrate + Nitrite	Les nitrates étaient autrefois appelés nitre ou salpêtre. La présence d'un excès de nitrates dissous dans l'eau est un indice de pollution d'origine agricole (engrais), urbaine (dysfonctionnement des réseaux d'assainissement) ou industrielle.	µmol.L-1
TURBIDITE	Turbidité	Teneur en matériaux en suspension.	Indice
SALI	Salinité	Salinité	Indice
TEMP	Température	Température	°C
OXYGENE	Oxygène dissous	Oxygène dissous	mg.L-1

Variables issues du réseau REPHY | <https://data.ifremer.fr>

### 3.2 Copernicus Marine Environment and Monitoring Service

Le Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) est un programme européen de surveillance de la Terre qui vise à rationaliser la collecte de données relatives à l'environnement issues de sources multiples dont la famille de satellites Sentinel, afin de disposer d'informations fiables, validées et certifiées. Le service de surveillance du milieu marin fournit des informations sur l'état et la dynamique des éléments physiques des écosystèmes océaniques et marins, qu'il s'agisse des océans à l'échelle planétaire ou des zones maritimes régionales européennes, à l'appui de la sécurité maritime, de la surveillance des flux de déchets, de l'environnement marin, des régions côtières et polaires et des ressources marines, ainsi que des prévisions météorologiques et de la surveillance du climat.

À l'aide d'observations satellitaires et in-situ et du modèle numérique d'océan NEMO, le service pré-opérationnel MyOcean2, coordonné par Mercator-Océan, produit à un rythme hebdomadaire ou journalier, pour l'océan global (résolution au 1/12ème de degré) et les mers européennes (résolutions de quelques km à 1/9ème de degré), des analyses et des prévisions de l'état physique de l'océan dans les trois dimensions (température, salinité, courants) et en surface (température, hauteur de la mer, couverture en glace), de même que des analyses de certaines caractéristiques bio-géochimiques en surface (couleur de l'eau, concentration en chlorophylle). Des ré-analyses sont également effectuées sur la période 1993-2011.

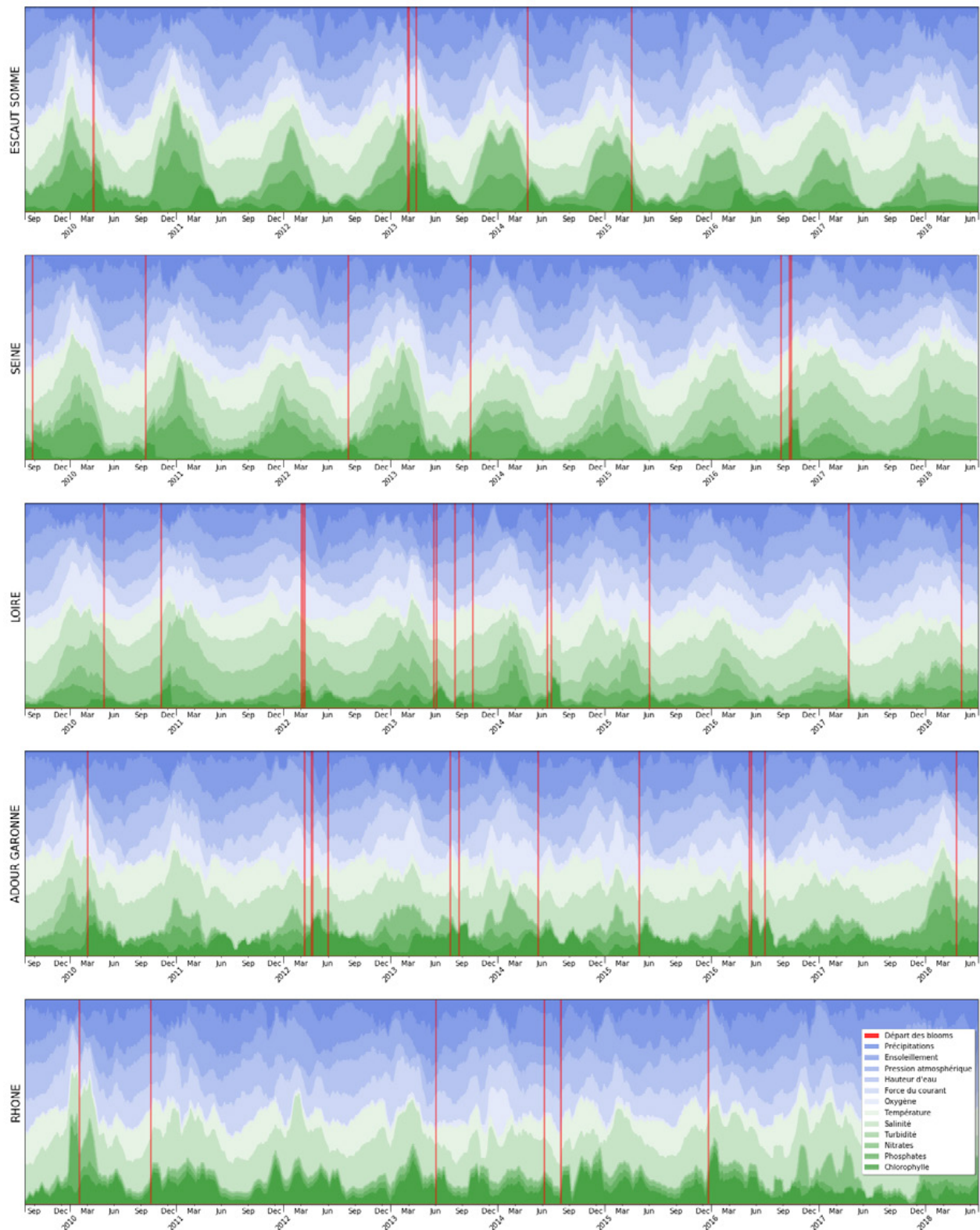
Ces données, stockées dans une base nommée ERA5, sont disponibles au public depuis juillet 2017. Dans le cadre de cette étude, les données récupérées ont une fréquence quotidienne pour une précision géographique de 0,25° en longitude et latitude et une période allant de 2000 à 2018 (c.f. Annexe 1).

Code	Libellé	Description	Unité
uo	Current Velocity	Vitesse du courant	m.s-1
deg0l	Zero degree level	Niveau d'eau par rapport au niveau 0 des cartes maritimes	m
sp	Surface pressure	Pression à la surface	Pa
ssr	Surface net solar radiation	Ensoleillement	J.m**-2
tp	Total precipitation	Somme des précipitations sur le district DCE.	m

Variables issues du réseau COPERNICUS | <http://marine.copernicus.eu>

## **4. Analyse statistique**

Le graphique ci-dessous présente les valeurs proportionnelles des éléments mesurés dans cette étude, classifiés par districts DCE, sur 9 ans, et sur une échelle ramenée au pourcentage. Les traits verticaux rouges correspondent aux moments du départ des blooms (quantile 95 des séries CHLOROA).



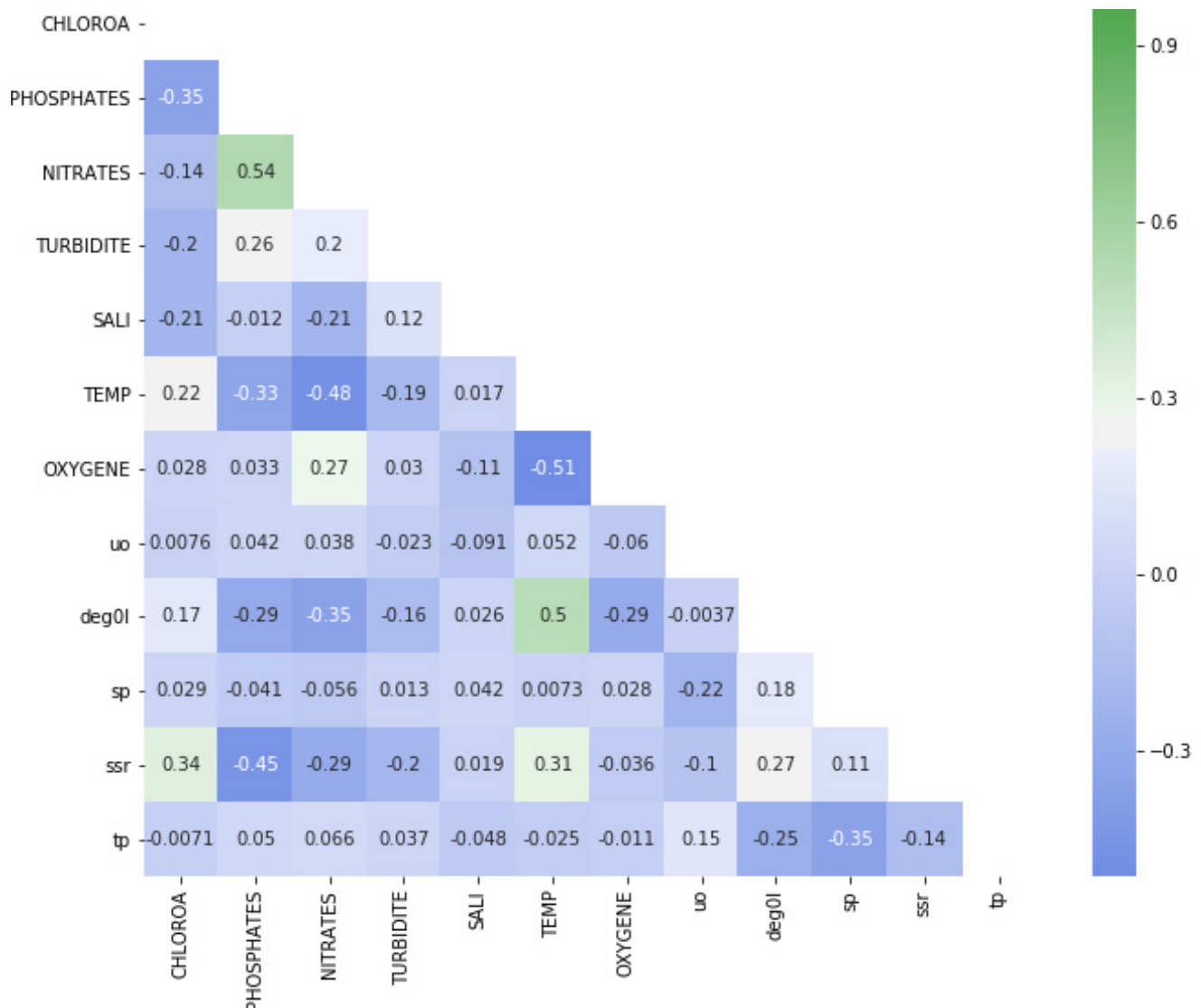
Le départ d'un bloom est lié aux conditions environnementales.

Il est déjà possible d'identifier visuellement la saisonnalité des variables, avec des pics de nitrates et phosphates en hiver suivis de pics de chlorophylle-a en été. D'autre part, les taux de précipitation en d'ensoleillement peuvent déjà apparaître comme dotés d'une corrélation inverse.



#### 4.1 Des données corrélées ?

La matrice de corrélation nous servira ici à visualiser aisément les possibles relations entre les variables. La méthode utilisée est celle de Pearson, qui produit un coefficient entre -1 et 1, les valeurs les plus extrêmes montrant une corrélation positive ou négative statistiquement significative.

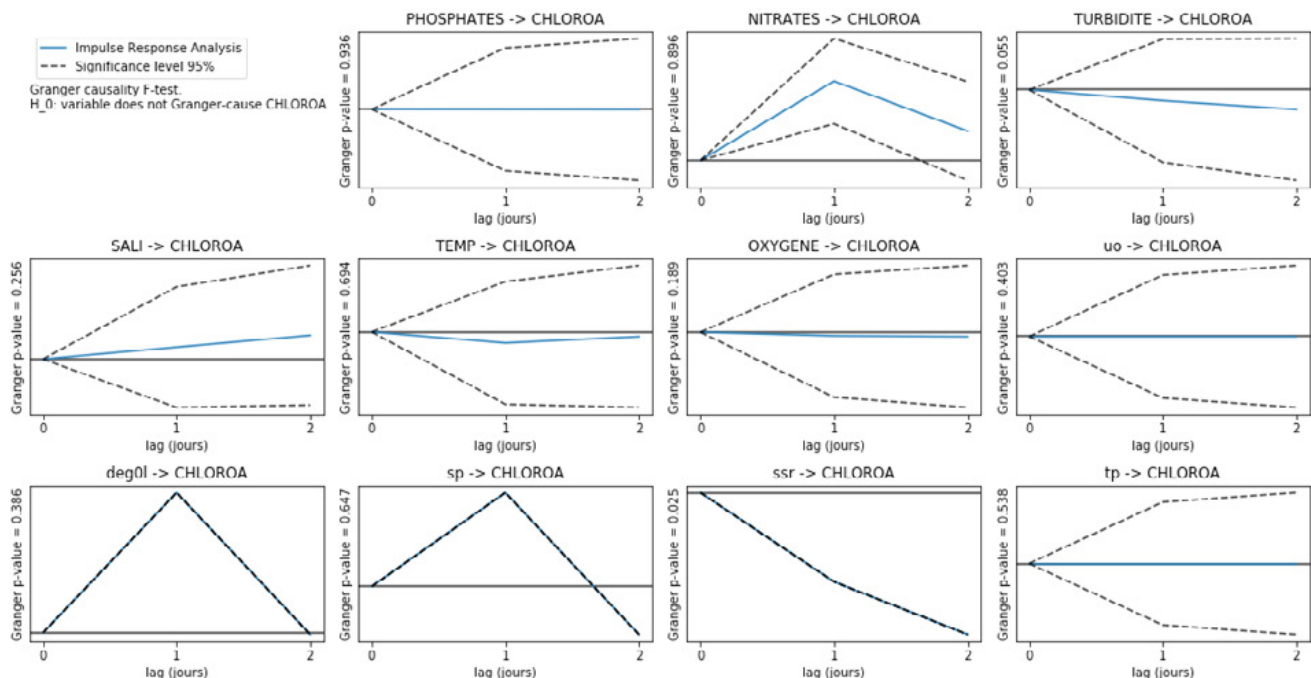


Matrice de corrélation des variables sélectionnées.

Dans la colonne qui nous intéresse, soit la variable dépendant CHLOROA, nous pouvons voir une relation assez significative, et négative, entre la quantité de phosphates et celle de chlorophylle-a. Des relations positives, quoique moins marquées, existent entre quantité de chlorophylle-a et température et ensoleillement.

## 4.2 Incidence d'une modification du milieu sur le taux de chlorophylle

Afin de proposer une estimation quantitative des relations entre les variables sélectionnées, nous utiliserons le modèle du Vecteur Autoregressif. Le Vecteur Autoregressif (VAR) est un modèle statistique développé par Christopher Sims au début des années 1980 qui permet de capturer les interdépendances entre plusieurs séries temporelles. Dans un modèle VAR, les variables sont traitées symétriquement de manière que chacune d'entre elles soit expliquée par ses propres valeurs passées et par les valeurs passées des autres variables.



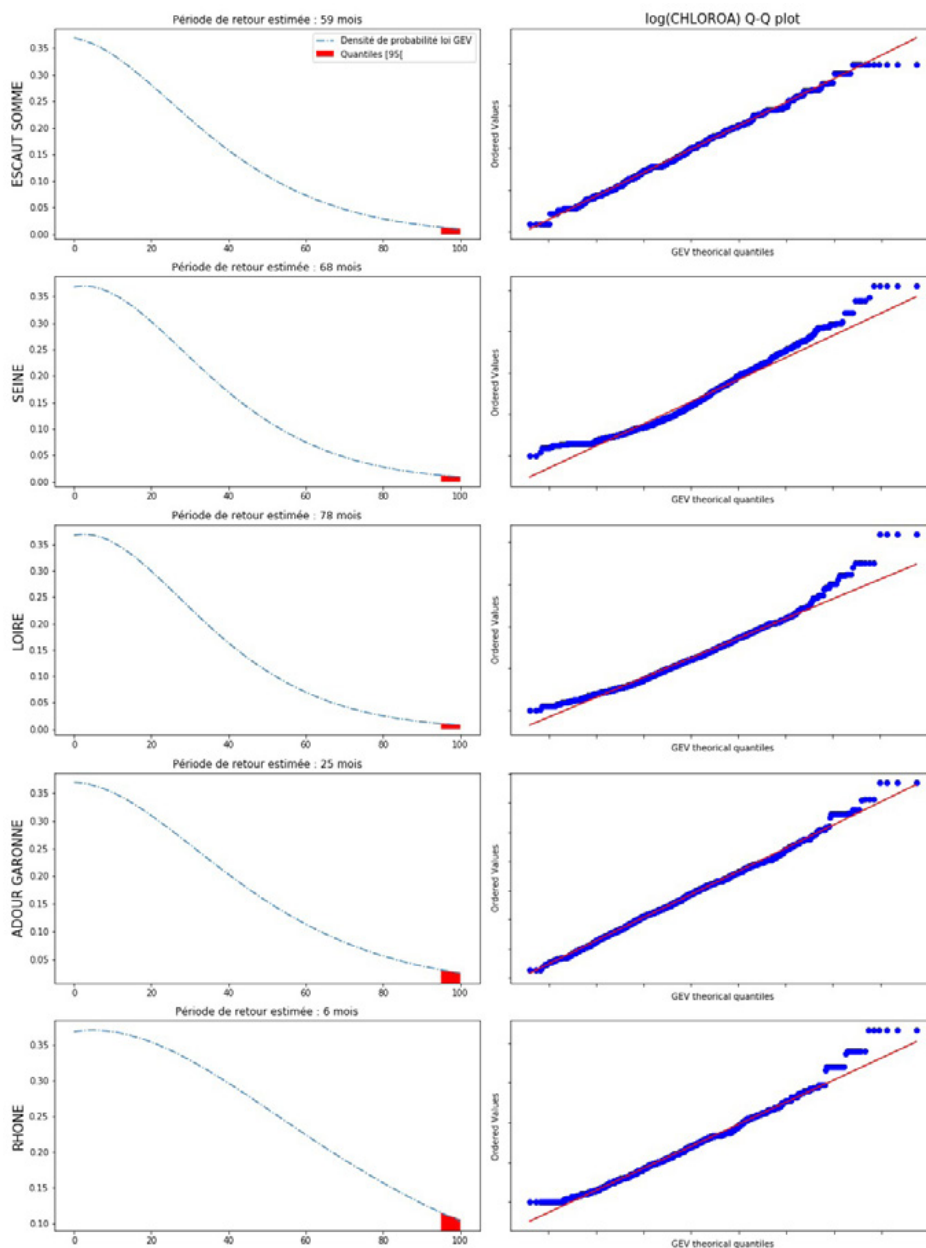
Réponse à l'augmentation de 1% d'une variable exogène sur la variable CHLOROA.

Le test « Impulse Response Analysis » va permettre de visualiser la conséquence de l'augmentation de 1% d'une variable exogène (ici les variables indépendantes PHOSPHATES,...,tp) sur la variable endogène CHLOROA, sur une durée de deux jours. On peut constater par exemple que les variables deg0l, sp et ssr auraient un impact avéré, avec un fort coefficient de déviation, alors que des variables comme PHOSPHATES ou tp n'auraient pas d'impact, avec une probabilité élevée.

Le test de causalité de Granger se sert des propriétés de prévisions des processus VAR pour fonder sa thèse et soutient que « H cause Y si la connaissance du passé de H améliore les prévisions sur Y ». Dans le cas présent les résultats indiquent, hormis pour les variables TURBIDITE et ssr, que le test n'est pas statistiquement significatif. On doit accepter l'hypothèse H<sub>0</sub> selon laquelle les variables ne sont pas la cause (causalité au sens de Granger) de la variable CHLOROA, avec un risque d'erreur de première espèce de 5%.

### 4.3 Une période de retour courte

Un modèle fréquemment utilisé dans l'étude des phénomènes climatiques est la méthode des Valeurs Extrêmes Généralisée (GEV). Basé sur l'analyse des valeurs marginales d'une série, il complète les modèles d'analyse classique adaptés aux courbe Gaussiennes. Dans le cas présent, il peut nous permettre d'estimer au mieux la période de la retour probable des blooms phytoplanctoniques.



Densité de probabilité de la quantité de chlorophylle-a et adéquation à la loi des valeurs extrêmes généralisée.

Pour chaque district DCE, est affiché la distribution de probabilité de la quantité de chlorophylle-a selon la loi GEV. Les plots Quantiles-Quantiles de droite montrent l'adéquation du logarithme des données à cette loi. La notion de temps de retour, se calcule selon la formule  $T = 1/p$ . Ainsi la durée la plus probable, selon ce modèle, avant la résurgence d'un phénomène de bloom avec une concentration de chlorophylle-a dans l'eau supérieure au quantile 95, est fournie en titre des graphiques.

## **5. Conclusion**



Les usages du sol et les activités humaines (urbanisation, industrialisation, agriculture) de ces cent dernières années ont radicalement amplifié les pressions et transformé les paysages. Ils ont impacté la qualité des sols, des eaux de surface et des eaux souterraines.

Les pouvoirs publics s'affairent efficacement, au niveau français et européen dans le cadre de la DCE, à mettre en place les instruments de mesure appropriés pour estimer l'ampleur du phénomène d'eutrophisation. Si la plupart de paramètres déclencheurs de ces blooms sont d'ordre physique (température, précipitations, etc.), il en est deux sur lesquels l'activité humaine a une influence directe : les taux de phosphates et de nitrates. Supposons que le rapport conjoint CNRS- Ifremer-INRA-Irstea sur le sujet, édité en 2017, saura attirer l'attention des décideurs et pouvoirs publics sur l'impact de ce fléau.

## 6. Références

Rapport CNRS- Ifremer-INRA-Irstea (France), 2017 *L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*. Rapport d'Expertise scientifique collective.

Lütkepohl H., 2005, *New Introduction to Multiple Time Series Analysis*. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Roncalli T., 2002, *Théorie des valeurs extrêmes ou modélisation des évènements rares pour la gestion des risques*. Polycopié de cours du DESS 203 de l'Université Paris IX Dauphine.

## **7. Annexe 1 : récupération des données COPERNICUS**



Le script Python suivant permet de récupérer la moyenne sur 24h de la pression atmosphérique à la surface (code sp), pour une période de 2007 à 2018, sur le secteur France métropolitaine, avec une finesse de grille de 0,25°, dans un fichier multi-dimensionnel au format NetCDF. Liste des codes ERA5: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+data+documentation>

```
#!/usr/bin/env python
import cdsapi
c = cdsapi.Client()
c.retrieve('reanalysis-era5-single-levels',
{
    'stream':'oper',
    'type':'fc',
    'param':'sp',
    'date': '2007-03-13/2018-07-31',
    'time':'15:00',
    'step':'1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12',
    'area': '52/-8/40/12',
    'grid': '0.25/0.25',
    'format': 'netcdf'
}, 'sp.nc')
```

Ces données sont ensuite filtrées par districts DCE et masses d'eau associées grâce à la librairie Regionmask (<https://github.com/mathause/regionmask>).

