

uob
uob
uob

université
de bretagne
occidentale



MASTER SML

SCIENCES DE LA MER ET DU LITTORAL

MENTION

EXPERTISE ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT LITTORAL

Sybill HENRY

Suivi à long terme des phénomènes d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer

Mémoire de stage de master 2

Année Universitaire **2014-2015**

Structure d'accueil : **GIP Loire Estuaire**

Tuteurs universitaires : **Jacques Grall & Jean-François Maguer**

Maître de stage : **Kristell Le Bot**



UBO
université de bretagne
occidentale

ueb
UNIVERSITÉ
EUROPÉENNE
DE BRETAGNE

GIP
Loire
Estuaire

agence de l'eau
Loire-Bretagne
Établissement public du ministère
chargé de développement durable

L'EUROPE
s'engage
sur le bassin de la Loire
avec le **FEDER**

Année 2014-2015

Master Sciences de la Mer et du Littoral
Mention Expertise et Gestion de l'Environnement Littoral

Sybill HENRY

Suivi à long terme des phénomènes d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer



Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire – GIP Loire Estuaire
Institut Universitaire Européen de la Mer – IUEM
Université de Bretagne Occidentale – UBO

Sous la tutelle de Kristell Le Bot, chargée d'études au GIP Loire Estuaire

Tuteurs universitaires : Jacques Grall, ingénieur de recherche et Jean-François Maguer, maître de conférences



Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Denis Musard, directeur du GIP Loire Estuaire, pour m'avoir permis de réaliser mon stage de fin d'étude au sein de sa structure.

Je tiens tout particulièrement à remercier Kristell Le Bot, pour son accueil, sa disponibilité, et surtout pour toute l'aide et le soutien qu'elle m'a apportés au cours de ces six mois de stage. Un grand merci pour les nombreux conseils, relectures et explications qui ont permis d'aboutir à ce rapport.

Merci également à mes deux tuteurs universitaires, Jacques Grall et Jean-François Maguer pour toutes les corrections et relecture qui ont permis une valorisation de ce travail.

Merci aux membres du Laboratoire Environnement Ressources Morbihan/Pays de la Loire du centre Ifremer de Nantes pour leur accueil lors de mes visites. Un grand merci à Philippe Souchu, à Dominique Soudant ainsi qu'à Widya Ratmaya d'avoir partagé avec moi leur connaissance et d'avoir répondu à mes nombreuses questions.

Je tiens également à remercier, l'ensemble des membres du pôle connaissance / diffusion, ainsi que tous ceux du GIP Loire Estuaire, pour l'accueil et la gentillesse dont ils ont tous fait preuve à mon égard. Merci à eux de m'avoir permis de réaliser mon stage de fin d'étude dans les meilleures conditions possibles. Un merci tout particulier à Stéphanie Aumeunier, coordinatrice du pôle connaissance / diffusion pour ces relectures et pour toute l'aide et le soutien apportés.

Merci à mes camarades du master EGEL pour ces deux années passées à leur côté et pour tous les bons moments passés ensemble en classe, sur le terrain de Ouessant à Saint-Brieuc ou dans les rues brestoises.

Un grand merci à mon ami Anatole, qui m'a fait découvrir la Loire, et son estuaire. Merci à lui d'avoir partagé avec moi son amour de la pêche traditionnelle en Loire et de m'avoir fait découvrir ce territoire qui m'était inconnu.

Enfin, un grand merci à mes parents, à mon frère et à Eliaz pour leur soutien quotidien tout au long de ces six mois.

Résumé

Au cours de ces dernières années, l'eutrophisation est devenue une problématique mondiale. Se traduisant par des efflorescences algales, l'eutrophisation concerne tous les milieux aquatiques qu'ils soient marins, lacustres ou fluviaux. Composé d'un ensemble de milieux remarquables, la Loire, de la Maine à la mer, (des Ponts-de-Cé à Saint-Nazaire) correspond à la zone d'étude du GIP LE. Le Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire (GIP LE) s'intéresse à toutes les thématiques environnementales qui ont trait à la Loire et son estuaire, parmi lesquelles figurent la qualité de l'eau.

L'intérêt de la présente étude est donc d'inventorier et d'analyser les événements d'eutrophisation observés, de la Maine à la mer, entre 1971 et aujourd'hui. L'objectif principal est de caractériser l'eutrophisation au travers des différents paramètres qui la conditionnent. Pour ce faire, différentes méthodes d'analyse ont été croisées afin de comprendre l'évolution de l'eutrophisation dans le temps.

Mots-clés : Eutrophisation, Loire, chlorophylle *a*, nutriments, estuaire

Abstract

In the recent years, eutrophication became a global issue. Express by algal efflorescence, eutrophication concern all aquatic system whether is marines, lacustrian or fluvial. Composed to an overall notable system, River Loire, to the Maine at the sea, (to Ponts-de-Cé at Saint-Nazaire) corresponds to studies area of GIP LE. The public concern association of Loire estuary (Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire) is interested by all environmental thematic who are in relation with Loire River and this estuary, including the water quality.

The interest of this study it is to inventory and analyze the eutrophication events observed in Loire river to the Maine at the sea between 1971 and today. The mean objective it is to characterized the eutrophication through the different factors who condition her. In order to do this different methods are cross in order to understand the eutrophication evolution in time.

Keywords : Eutrophication, Loire, chlorophylle *a*, nutrients, estuary

Sommaire

INTRODUCTION	1
Partie 1 – Cadre d'étude	1
1.1. Le Groupement d'Intérêt Public Loire estuaire	1
1.1.1. QU'EST-CE QU'UN GROUPEMENT D'INTERET PUBLIC ?.....	1
1.1.2. LE GIP LOIRE ESTUAIRE	1
1.2. Présentation du territoire : La Loire et son estuaire.....	3
1.2.1. LA LOIRE ET SON BASSIN VERSANT	3
1.2.2. L'ESTUAIRE DE LA LOIRE	4
1.3. Suivi à long terme des phénomènes d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer	5
1.3.1. PRESENTATION DU STAGE ET DES OBJECTIFS	5
1.3.2. CONTRIBUTION AU PROGRAMME DE RECHERCHE « DIAGNOSTIC ETENDU DE L'EUTROPHISATION » - DIETE	6
Partie 2 - Synthèse bibliographique sur l'eutrophisation	8
2.1. Qu'est-ce qu'un phénomène d'eutrophisation ?.....	8
2.1.1. DEFINITION.....	8
2.1.2. ORIGINE ET UTILISATION DES NUTRIMENTS PAR LE PHYTOPLANCTON.....	8
2.1.3. LES CONDITIONS DE L'EUTROPHISATION	11
2.1.4. LES PROCESSUS LIES A L'EUTROPHISATION	12
2.1.5. LES PARAMETRES FAVORISANT L'EUTROPHISATION	14
2.1.6. CONSEQUENCES ECONOMIQUE ET PERCEPTION DE L'EUTROPHISATION.....	15
2.2. Le cas particulier des estuaires	15
2.3. Suivi de l'eutrophisation sur le long terme : Cas de la Loire (France)	16
2.3.2. SPECIFICITES DES PARAMETRES DE L'EUTROPHISATION EN LOIRE	16
2.3.3. INVENTAIRE DES EVENEMENTS D'EUTROPHISATION EN LOIRE DEPUIS 1970, DE LA MAINE A LA MER	18
2.2. Législation en vigueur	20
2.2.1. LEGISLATION ET NORMES EUROPEENNE.....	20
2.2.2. APPLICATION DANS LE DROIT FRANÇAIS ET MESURES NATIONALES	20
2.4. Perspectives et tendances d'évolution de l'eutrophisation	22
2.5. Conclusion.....	23
Partie 3 – Mise à jour et traitement des données	25
3.1. Données à dispositions	25
3.1.1. DELIMITATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	25
3.1.2. RESEAUX DE MESURES ET PARAMETRES UTILISES.....	26
3.1.3. FREQUENCE ET PERIODE D'ACQUISITION DES DONNEES.....	27
3.2. Base de données du GIP Loire Estuaire et Mise à jour des fiches de suivi à long terme.....	27
3.2.1. CREATION DE LA BASE DE DONNEES.....	27

3.2.2. MISE A JOUR DES FICHES DE SYNTHÈSE.....	30
3.3. Contribution au programme de recherche DIETE.....	40
3.3.1. ANALYSE DES SÉRIES TEMPORELLES SELON O'BRIEN & AL, (2012)	41
3.3.2. ANALYSE DES SÉRIES TEMPORELLES SELON PETRIS & AL, (2010)	47
3.3.3. CONCLUSION.....	56
Partie 4 - Inventaire de l'eutrophisation en Loire.....	57
4.1. Les grilles de qualité et les seuils existants	57
4.1.1. LES MASSES D'EAU DOUCE.....	57
4.1.2. LES MASSES D'EAU DE TRANSITION.....	58
4.2. Recensement et caractérisation des événements d'eutrophisation en Loire	59
4.2.1. COMPARAISON DES DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES ET DES DONNÉES BRUTES	59
4.2.2. IDENTIFICATION DES EFFLORESCENCES ALGALES.....	60
4.2.3. CARACTÉRISATION DES EFFLORESCENCES ALGALES	61
CONCLUSION – PERSPECTIVES.....	64

Note aux lecteurs

L'ensemble des illustrations et des photographies de ce présent rapport sont l'œuvre ou la propriété de l'auteur sauf indications contraires situées à proximité immédiate de l'illustration/photographie

*La lente Loire passe altière et, d'île en île,
Noue et dénoue au loin, son bleu ruban moiré,
La plaine, mollement le suit de ville en ville,
Le long des gais coteaux de vigne et de forêt ;*

*Elle mire, orgueilleuse, aux orfrois de sa traîne,
Le pacifique arroi de mille peupliers,
Et sourit doucement à tout ce beau domaine,
De treilles, de moissons, de fleurs et d'espaliers ;*

Extrait de « **La clarté de vie** » Francis Vielé-Griffin, 1897

INTRODUCTION

Prenant sa source au Mont Gerbier de Jonc en Ardèche, et après une traversée de 1012 km à travers 9 régions de France métropolitaine, la Loire fluviale devient maritime sur les 97 km qui séparent Anetz de son embouchure à Saint-Nazaire. La Loire telle qu'elle existe aujourd'hui est le témoin des changements d'activités et des aménagements qui ont été réalisés sur son bassin versant et sur son linéaire au cours des siècles. Les derniers 147 km de « Loire Océane » constituent le territoire d'étude du GIP Loire Estuaire qui, à travers son pôle « connaissance / diffusion », s'intéresse à toutes les thématiques environnementales pouvant avoir un lien avec la Loire et son estuaire.

La qualité de l'eau et les problèmes d'eutrophisation, qui peuvent y être liés sont donc des sujets d'intérêt du GIP Loire Estuaire, qui par l'intermédiaire de ces suivis long terme, étudie l'évolution des nutriments et du phytoplancton en Loire au cours du temps. Bien que l'eutrophisation ne soit pas un phénomène récent, elle constitue aujourd'hui une problématique mondiale.

L'intérêt de cette étude est donc d'observer l'évolution des phénomènes d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer, par l'intermédiaire d'une mise à jour des suivis à long terme menés par le GIP Loire Estuaire, à travers les fiches de synthèses « nutriments » et « vitalité du phytoplancton végétal ». Associée à l'utilisation de différentes méthodes d'analyses de séries à long terme, la mise à jour des données permet de dégager les tendances d'évolution de certains paramètres en lien plus ou moins direct avec l'eutrophisation.

Le présent rapport est composé de quatre parties qui ont pour objectifs de comprendre et d'inventorier les processus d'eutrophisation en Loire sur la période de 1970 à aujourd'hui. La première partie est une recherche bibliographique, qui a pour but d'établir un premier inventaire des phénomènes d'eutrophisation en Loire depuis les années 1970, à travers différents événements pouvant être décrits dans la littérature grise. Elle permet également d'avoir une approche bibliographique des phénomènes d'eutrophisation, afin de comprendre le lien existant entre les différents processus qui en sont à l'origine, en particulier en milieu fluvial. La seconde partie est consacrée à l'analyse des données. La méthodologie liée à la création de la base de données, ainsi que la présentation des réseaux et des producteurs de données présents de la Maine à la mer, y sont décrites. Ces données sont utilisées pour la mise à jour des suivis à long terme menés par le GIP LE (fiches de synthèse) et établir ainsi, des tendances d'évolution. Sont également détaillés les résultats des deux méthodes d'analyse statistique utilisées par Ifremer dans le cadre du programme DIETE sur la Vilaine, et qui furent appliquées à la Loire. Enfin, un inventaire de l'eutrophisation en Loire sur la période 1970-2015 sera établi dans une dernière partie à travers l'utilisation de seuils existants, dont ceux des grilles d'évaluation de la qualité de l'eau.



PARTIE 1 – CADRE D’ETUDE

1.1. Le Groupement d’Intérêt Public Loire estuaire

1.1.1. QU’EST-CE QU’UN GROUPEMENT D’INTERET PUBLIC ?

Les Groupements d’Intérêt Public (GIP) sont des structures publiques mises en place par application de la loi du 15 juillet 1982 relative à l’orientation et à la programmation pour la recherche et le développement technologique en France. Créés pour les seuls besoins du secteur de la recherche ; la mission première des GIP est d’assurer, pour une durée déterminée, des activités de recherche, de développement technologique, de gestion d’équipement ou de mise en œuvre des politiques publiques dans un intérêt commun (legifrance.gouv.fr).

Aujourd’hui régis par la loi n°2011-525 du 17 mai 2001 relative à la simplification et à l’amélioration de la qualité du droit, les GIP sont constitués par convention approuvée par l’Etat. Ces conventions peuvent être établies entre des personnes morales de droit public ou entre plusieurs personnes morales de droit public et privée (legifrance.gouv.fr ; economie.gouv.fr). Sur un territoire, la création d’un GIP a pour objectif de favoriser la coopération entre les personnes morales d’ordre publics et/ou privées afin de pouvoir gérer des équipements ou des activités qui ont un intérêt pour la communauté (economie.gouv.fr).

Les GIP sont des structures partenariales à but non lucratif. Pour assurer son bon fonctionnement, les membres peuvent mettre à sa disposition différents moyens comme du personnel, des locaux ou des financements. Ils peuvent être créés dans différents domaines comme la santé, l’urbanisme ou encore l’environnement comme c’est le cas du GIP Loire Estuaire.

1.1.2. LE GIP LOIRE ESTUAIRE

a. Création et fonctionnement

Le GIP Loire Estuaire (GIP LE) est donc une structure partenariale qui trouve son origine dans la Cellule de Mesures et de Bilans (CMB) créée en 1998. La CMB est née dans le cadre du 1^{er} « Plan Loire Grandeur Nature », suite au constat d’un manque de connaissance et de coordination des données existantes sur la Loire et son estuaire. Etablie par convention entre le préfet des Pays de la Loire et le président de l’Association Communautaire de l’Estuaire de la Loire (ACEL), la CMB avait pour mission de connaître, comprendre, suivre et informer sur l’état environnemental de la Loire, de la Maine à la mer (figure 1).



Figure 1 : Carte du domaine d’étude du GIP Loire Estuaire : La Loire, de la Maine à la mer (source : GIP Loire Estuaire)

Devenue GIP Loire Estuaire en 2004, cette structure partenariale est renouvelée pour la période 2015 – 2021 et rassemble les différents acteurs du territoire ligérien par l’intermédiaire de 9 membres financeurs :

- Etat
- Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire (GPMNSN)
- Voies Navigables de France (VNF)
- Région Pays de la Loire
- Département Loire-Atlantique
- Nantes Métropole
- Communauté d'Agglomération de la Région Nazairienne et de l'Estuaire (CARENE)
- Union Maritime Nantes Ports (UMNP)
- Association des Industriels de Loire Estuaire (AILE)

Présidé par Freddy Hervocho (vice-président du conseil départemental de Loire-Atlantique) depuis juin 2015, le GIP Loire estuaire est également subventionné par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB) et par l'Union Européenne (fonds européens FEDER) (figure 2).



Figure 2 : Ensemble des membres et des financeurs du GIP Loire Estuaire (source : GIP Loire Estuaire)

Le GIP Loire Estuaire repose sur 4 pôles qui sont complémentaires dans l'accomplissement de sa mission principale de connaissance et de compréhension du fonctionnement du fleuve, de l'estuaire et des écosystèmes qui y sont liés :

- Pôle « connaissance / diffusion » : Etude et suivi du fonctionnement environnemental de la Loire de la Maine à la mer (fonctionnement physique et biologique, usages du fleuve...);
- Pôle « programme structurant » : Elaboration de scénario tendanciel dans un objectif de rééquilibrage du fleuve pour un meilleur usage de ses fonctionnalités ;
- Pôle « Ressources humaines » : Assistance financière et juridique (loire-estuaire.org) ;
- Pôle « SAGE – ASTER » : Animation du SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) qui est un outil mis en place à l'échelle d'un territoire, dans le but d'assurer une coordination de l'ensemble des actions nécessaires à l'amélioration de la qualité de l'eau et des milieux. Le SAGE participe également à la gestion de la ressource en eau ainsi qu'à la limitation du risque d'inondation. La cellule d'Animation et de Suivi des Travaux En Rivière et milieux aquatiques (ASTER) fournit un appui technique aux collectivités locales et coordonne à l'échelle d'un territoire des actions cohérentes sur le milieu aquatique (sage-estuaire-loire.org ; loire-estuaire.org).

Le domaine d'étude du GIP Loire Estuaire s'étend de la Maine à la mer (loire-estuaire.org). Ce secteur représente la partie aval du fleuve Loire (environ 147 km sur les 1012 km de linéaire total du fleuve) et comprend une succession de milieux caractéristiques, allant du système strictement fluvial aux Ponts-de-Cé, jusqu'à l'océan Atlantique au large de Saint-Nazaire (loire-estuaire.org).

b. Le pôle « connaissance / diffusion »

Le pôle « connaissance / diffusion » assure globalement la même fonction qu'un observatoire de l'environnement, à travers son objectif principal de compréhension et de suivi du fonctionnement environnemental de la Loire sur son domaine d'étude s'étendant de la Maine à la mer. De ce fait, il assure 3 missions principales :

- Assurer l'organisation, la structuration et l'analyse des différentes données et connaissances scientifiques recueillies sur le fonctionnement du fleuve et de son estuaire ;
- Acquérir des données, en tant que de besoin, pouvant être de nature physique, chimique et/ou biologique ;
- Partager la connaissance par la diffusion régulière de bilans et de synthèses.

Dans l'objectif d'avoir une vision intégrée du fonctionnement du fleuve et de comprendre sa dynamique sur le long terme, une grille de suivi a été constituée et repose essentiellement sur des travaux d'inventaires et d'analyses. Regroupant près d'une quarantaine de fiches de synthèses, ces dernières sont réparties sous trois thématiques appelées « clefs de lecture » :

- La lecture 1, « Les mouvements » traite de la variabilité des conditions estuariennes, fonction du fleuve et de l'océan (marée dynamique, salure et dessalure, submersibilité, transport sédimentaire...)
- La lecture 2, « La dynamique de la vie » rend compte de la potentialité et de la vitalité des écosystèmes observables en Loire (diversité des milieux, peuplements, éléments nutritifs...)
- La lecture 3, « L'environnement humain » témoigne de l'évolution des usages et des activités humaines liées au fleuve (pêche, extractions de sables, dynamique d'occupation des sols, inondations...)(GIP Loire Estuaire, 2002).

1.2. Présentation du territoire : La Loire et son estuaire

1.2.1. LA LOIRE ET SON BASSIN VERSANT



Figure 3 : Carte du bassin versant de la Loire, de sa source à l'embouchure (d'après cartographie DIREN Centre, 2003 – Donnée ©SRTM NASA/JPL - © BDCarthage – IGN)

Traversant 9 régions et 25 départements, la Loire est, avec ces 1012 km de long, le plus long fleuve de France. Subdivisé en trois parties : haute Loire, Loire moyenne et Loire océane (basse Loire) ; le fleuve prend sa source au Mont Gerbier de Jonc (Ardèche) et rejoint l'océan à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique). Le bassin versant de la Loire couvre 118 000 km², soit près d'un cinquième du territoire métropolitain (figure 3).

Le régime hydrologique de la Loire témoigne également de sa spécificité, alternant périodes de crue et d'étiage, pour un débit moyen annuel à la station fluviale de Montjean-sur-Loire de 845m³/s.

Les variations de son hydrologie sont relativement fortes avec un débit journalier minimal de 50 m³/s atteint lors de l'étiage très sévère de 1949 et maximal de 6300m³/s lors de la crue centennale de 1910.

Au cours du temps, les usages anthropiques du fleuve ont façonné le territoire à travers le développement d'activités tournées principalement vers l'élevage, le maraîchage ou encore la viticulture. Bien que le fond de vallée soit inondable, les agglomérations se sont développées tout au long du fleuve, la plus peuplée étant Nantes (environ 280 000 habitants). La vallée alluviale de Loire, de la Maine à la mer, se caractérise par une mosaïque de milieux de près de 55 000 hectares. La partie estuarienne en aval de Nantes, représente à elle seule, 20 000 hectares et est riche d'une grande diversité d'habitats (plus ou moins humides, plus ou moins salés) qui en font un site remarquable composé de vasières, de roselières et de prairies humides (com. Pers, GIP Loire Estuaire).

1.2.2. L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

Lieu de rencontre entre le fleuve et l'océan, l'estuaire de la Loire s'étend sur 97 km de l'embouchure à Saint-Nazaire à Anetz. Les apports d'eau de mer à l'estuaire sont aujourd'hui estimés à 150 milliards de m³/an quand ceux d'eau douce varient entre 13 et 45 milliards de m³/an.

Voie privilégiée de navigation entre l'océan et les eaux intérieures, l'estuaire de la Loire a connu trois grandes doctrines d'aménagements :

- « Doctrine du resserrement » (1755-1875) : Resserrement du lit du fleuve avec la volonté d'avoir un estuaire à dominance fluviale par mise en place de digues submersibles
- « Doctrine de la séparation » (1892-1930) : Doublage de la voie de navigation par construction du canal maritime de la Basse Loire (canal de la Martinière) en 1892. Long de 15 km, ce canal fut fermé à la navigation en 1913 du fait de sa faible profondeur (6 m)
- « Doctrine de l'ouverture » (1900) : Ouverture de l'estuaire sur la mer par approfondissement des chenaux de navigation, endiguement et comblement des bras de Loire afin de faire remonter l'onde de marée, et avec elle, les bateaux le plus loin possible

Cette succession d'aménagements a façonné l'estuaire tel qu'il est décrit aujourd'hui : un estuaire complexe à la fois dynamique, turbide et salé (figure 4).



Figure 4 : Carte des différents secteurs de la Loire et de son estuaire (source : GIP Loire Estuaire)

L'estuaire dynamique est caractérisé par la marée et le volume d'eau oscillant qu'elle génère. La notion de dynamisme est induite par une variation dans le temps et de l'intensité du phénomène de marée qui s'amortit peu à peu vers l'amont, par confrontation au débit du fleuve. En période de faible débit et de marée de vives eaux, l'impact de cette onde de marée peut être observé jusqu'à Anetz (97 km de l'embouchure à Saint-Nazaire), délimitant l'estuaire.

L'estuaire salé est caractérisé par un front de sel à 0,5 dont la remontée sera fonction des équilibres entre le fleuve et l'océan. En période de faible débit et de vives eaux, le sel parvient au plus loin dans l'estuaire à Sainte-Luce-sur-Loire, par le biais de deux processus majeurs : le « pompage tidal » caractérisé par une remontée des eaux marines dans l'estuaire par le phénomène de marée qui est d'autant plus amplifié en période de vives eaux ; l'action de la densité, avec des eaux salées plus denses qui vont remonter l'estuaire par le fond et qui seront diluées par les eaux de surface.

Enfin, l'estuaire turbide est caractérisé par la présence d'un phénomène naturel des estuaires macro-tidaux, comme la Loire, le bouchon vaseux et la crème de vase. Le bouchon vaseux se compose d'un mélange de matière organique et de sédiments fins en suspensions, qui s'accumulent à la confluence des eaux douces et salées. La densité et la localisation du bouchon vaseux est fonction des conditions de débit et des coefficients de marée. La crème de vase se forme lorsque l'intensité des courants diminue. La décantation des particules fines en suspension va contribuer à former une boue fluide (« crème de vase liquide ») qui, en se tassant sous son poids va être à l'origine d'une boue plus visqueuse constituant la crème de vase au sens strict. Majoritairement présent dans le secteur entre Paimboeuf et Le Pellerin selon le réseau de suivi SYVEL¹, le bouchon vaseux et le panache turbide qui lui est associé peut, en période d'étiage et vives eaux, remonter jusqu'à Mauves-sur-Loire, soit à près de 72 km en amont de l'embouchure (figure 5) (com. Pers, GIP Loire Estuaire).

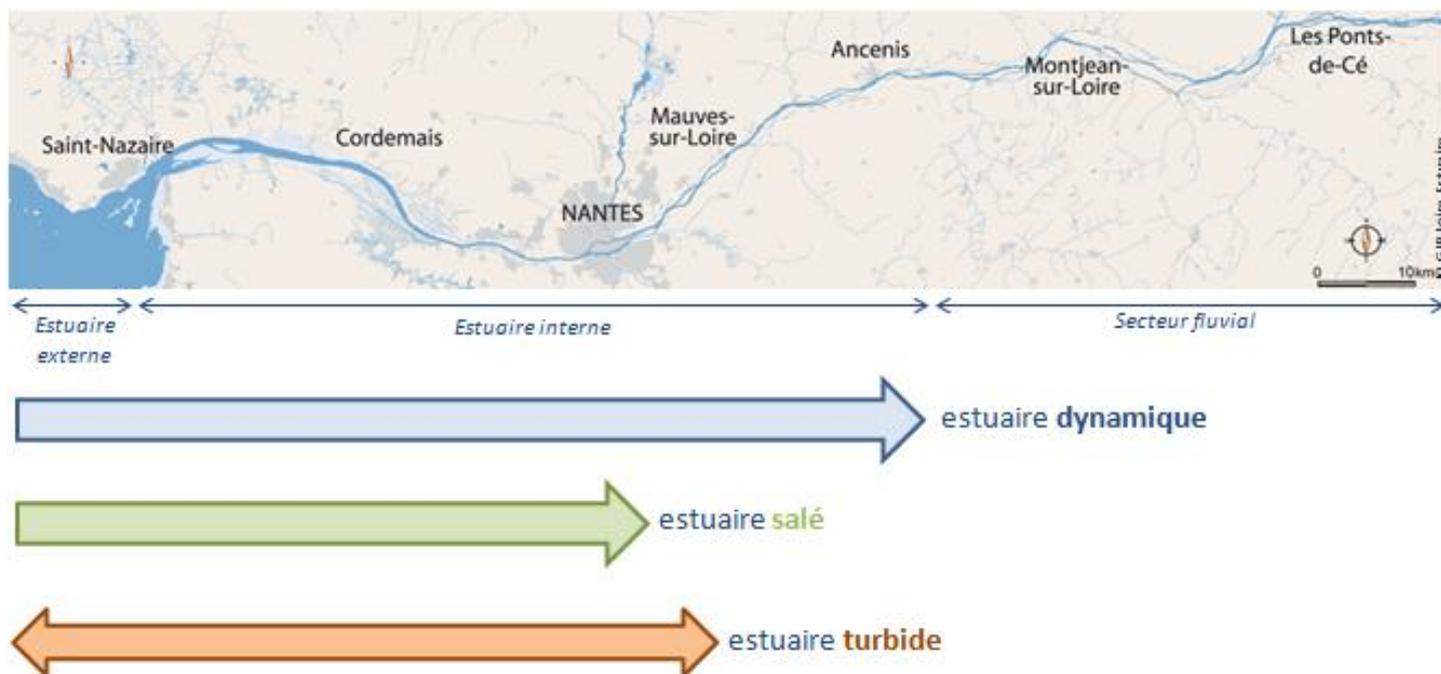


Figure 5 : Illustration des trois estuaires : estuaire dynamique, estuaire salé et estuaire turbide (source : GIP Loire Estuaire)

1.3. Suivi à long terme des phénomènes d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer

1.3.1. PRESENTATION DU STAGE ET DES OBJECTIFS

En lien avec le pôle « connaissance/diffusion » du GIP Loire Estuaire, l'objectif principal de ce stage est d'approfondir la connaissance sur le suivi des nutriments en Loire sur le domaine d'étude du GIP LE, allant de la Maine à la mer. A travers les données recueillies, il s'agit d'établir un inventaire des phénomènes d'eutrophisation en Loire, sur ces 30 à 40 dernières années, dans le but de définir une tendance d'évolution. Pour ce faire, une étude bibliographique servant à inventorier les événements d'eutrophisation survenus depuis les années 1970 est nécessaire. Puis la création d'une base de données regroupant l'ensemble des paramètres ayant un rôle plus ou moins direct dans les épisodes d'eutrophisation permettra d'établir les seuils évoquant un événement d'eutrophisation. Cette base servira également lors de la mise à jour des suivis du GIP Loire Estuaire, publiés sous forme de fiches de synthèse.

¹ SYVEL, Système de Veille dans l'Estuaire de la Loire : Réseau de suivi de la Loire et de son estuaire, mis en place en 2007 par le GIP Loire Estuaire. Réseau qui compte aujourd'hui 6 stations réparties entre Nantes et Donges permettant de suivre l'évolution de différents paramètres physico-chimiques que sont : la température, la conductivité (pour la salinité), l'oxygène dissous et de la turbidité (matières en suspensions) en sub-surface (station de Donges ayant deux systèmes de prélèvements à 1 et 4 m de profondeur).

Etant donné son intérêt pour les phénomènes d'eutrophisation, ce stage contribue également au programme de recherche « Diagnostic Étendu de l'Éutrophisation » (DIETE), pour sa partie concernant les flux de nutriments en Loire. L'objectif du stage dans le cadre de ce programme, est de traiter les données de la Loire avec une méthodologie identique aux traitements des données de la Vilaine.

1.3.2. CONTRIBUTION AU PROGRAMME DE RECHERCHE « DIAGNOSTIC ÉTENDU DE L'ÉUTROPHISATION » - DIETE

a. Présentation

Les programmes de recherches sont des travaux visant à améliorer la connaissance dans un domaine, par la mise en place d'un projet, dans le but d'atteindre des objectifs précis sur une période de temps donnée. Le programme de recherche « Diagnostic Étendu de l'Éutrophisation » (DIETE) a débuté en janvier 2014 pour se terminer en 2017, sous la coordination de Philippe Souchu, chercheur en écologie côtière au Laboratoire Environnement Ressources Morbihan/Pays de la Loire du centre Atlantique de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER).

Ce projet de recherche part des interrogations faites sur l'eutrophisation suite à la crise anoxique de 1982 en Baie de Vilaine. L'absence de crise majeure dans la région du Mor Braz depuis 1982 interroge la communauté scientifique sur les causes précises qui furent à l'origine de cette crise anoxique (figure 6). De nombreuses questions se sont alors posées sur la qualité des eaux dans le Mor Braz afin de savoir si celle-ci s'était, ou non, dégradée avec le temps. En lien avec les phénomènes d'eutrophisation, le programme DIETE s'interroge quant aux apports fluviaux de matière organique (Vilaine et Loire) et plus globalement à la dynamique complexe qui s'articule autour des nutriments.



Figure 6 : Carte du Mor Braz, secteur d'étude du programme de recherche DIETE (source : www.googlemaps.fr)

Si les objectifs du programme DIETE sont multiples, l'objectif final est de proposer, des scénarios réalistes de restauration du Mor Braz. Afin d'aboutir à la création d'un schéma d'évolution sur 30 ans, la première année du programme consiste à récolter des données en lien direct ou indirect avec l'eutrophisation dans le secteur du Mor Braz. Ces données concernent les flux et les concentrations en

nutriments ainsi que les variables pouvant être liées à la production primaire (température, chlorophylle *a*...). Afin de déterminer le rôle des sédiments dans leur capacité à re-larguer des nutriments dans la colonne d'eau, des études exploratoires seront également menées dans le but de proposer un modèle biogéochimique au sein du compartiment sédimentaire et leur rôle dans les phénomènes d'eutrophisation. L'ensemble de ces données permettra de mettre en évidence un schéma saisonnier des apports en azote (N) et phosphore (P) ainsi que du recyclage de ces nutriments à l'interface eau/sédiment (com. Pers, IFREMER).

b. Objectifs du stage dans le programme DIETE

Participant au comité de pilotage du projet, le GIP Loire Estuaire contribue au programme DIETE par l'apport de connaissances et de données sur la Loire et son estuaire.

Dans le cadre de cette contribution, l'objectif du stage est d'utiliser les données synthétisées sur la Loire lors de la création de la base de données, avec des méthodes d'analyse statistiques utilisées par Ifremer. Cette contribution se fait par l'utilisation de deux méthodes d'analyse de séries temporelles :

- « Modèle des anomalies » selon *O'Brien & al, (2012)*
- « Modèle linéaire dynamique » selon *Petris & al, (2007)*

PARTIE 2 - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EUTROPHISATION

2.1. Qu'est-ce qu'un phénomène d'eutrophisation ?

2.1.1. DÉFINITION

L'**eutrophisation n'est pas un phénomène récent**, et, selon Paerl en 1988, les premières observations faites de ce phénomène remontent à l'Égypte antique : « Partout en Égypte, les eaux du fleuve devinrent rouge sang. Tous les poissons qui étaient dans le fleuve moururent et les Égyptiens ne pouvaient plus boire son eau » (Exode 7:17) (Paerl, 1988).

Au fil des siècles, les descriptions d'eaux colorées se succèdent et sont rapportées par des voyageurs, comme Marco Polo et Magellan, qui observent des mortalités chroniques de moules et de coquillages en zone côtière ; ou par des scientifiques tel que Giraldu Cambriensis qui, en 1188 décrit des phénomènes, aujourd'hui reconnus comme caractéristiques de l'eutrophisation, dans un cours d'eau du Becknocksire en Angleterre (Paerl, 1988).

Si le phénomène d'eutrophisation est connu, qu'en est-il réellement et quelle en est son origine ?

Dans la littérature, le terme « eutrophisation » est généralement employé sans définition préalable précise et peut varier dans sa terminologie selon les auteurs (Ménésquen, 2001). Si « **eutrophisation** » provient étymologiquement du terme **eutrophe** qui signifie **bien nourri** (Ménésquen, 2001), sa définition et son utilisation dans la sphère scientifique a été sujet à de nombreux débats (Nixon, 1995 ; Smith & al, 2006). La première définition de l'eutrophisation est attribuée à Weber qui, en 1907, utilise ce terme pour décrire l'aspect des zones humides. Ses observations se basent sur la couleur de l'eau, les teneurs en oxygène et les modifications de populations de macro-invertébrés benthiques (Schindler, 2006). L'eutrophisation désigne ici un état observé d'un milieu naturel (Nixon, 1995 ; Schindler, 2006).

Dans les années 1960 - 1970 le terme « eutrophisation » prend un nouveau sens, notamment grâce au Symposium sur l'Eutrophisation de 1971 de l'ASLO (American Society of Limnology et Oceanography) (Schindler, 2006 ; Smith & al, 2006). L'eutrophisation est désormais utilisée dans un **sens dynamique** impliquant des notions de **processus** et d'**interactions** au sein d'un écosystème (Nixon, 1995 ; Schindler, 2006). Il traduit alors un **enrichissement d'un écosystème aquatique** avec des **nutriments** pouvant mener à des **blooms algaux** et des **événements anoxiques** (Nixon, 1995 ; Carpenter, 2005). D'une manière plus simplifiée, Nixon définit l'eutrophisation comme une « **augmentation du taux d'alimentation de la matière organique d'un écosystème** » (Nixon, 1995).

Pour un grand nombre d'auteurs, l'eutrophisation regroupe l'ensemble des processus biogéochimiques et écologiques qui prennent place dans un milieu aquatique en réponse à une fertilisation d'**origine anthropogénique** (Nixon, 1995 ; Cloern, 2001 ; De Jonge & al, 2002). Regroupant une multitude de mécanismes physico-chimiques, c'est un **processus complexe d'évolution d'un état trophique vers un autre** (Nixon, 1995 ; Cloern, 2001 ; De Jonge & al, 2002) : Oligotrophe > Mésotrophe > Eutrophe > Hyper-eutrophe (Nixon, 1995).

Le premier niveau trophique concerné par ces déséquilibres du milieu est celui situé en bas de la chaîne alimentaire caractérisé par la production primaire (Nixon, 1995 ; Carpenter, 2005) et qui se manifeste par une prolifération algale excessive ne pouvant être totalement consommé par le zooplancton (Paerl, 1988 ; Cloern, 2001).

2.1.2. ORIGINE ET UTILISATION DES NUTRIMENTS PAR LE PHYTOPLANCTON

L'eutrophisation devient peu à peu un phénomène mondial, qui s'est intensifié aux cours de ces dernières décennies (Paerl, 1988). Si l'observation de phénomènes d'eutrophisation n'est pas nouveau, le fait que celui-ci devienne problématique est relativement récent (Carpenter, 2005). Malgré une **possible réversibilité** du processus, l'eutrophisation devient récurrente dans certaines masses d'eau du fait des **activités humaines** et des **apports anthropiques** (Paerl, 1988 ; Carpenter, 2005). Ces apports d'éléments nutritifs sont susceptibles d'engendrer un épisode d'eutrophisation et peuvent être d'origine différente :

- **Origine allochtone** en relation avec les apports anthropiques précédemment évoqués, auxquels s'ajoutent les apports terrigènes et sédimentaires provenant majoritairement de l'érosion des sols (De Jonge & al, 2002). En estuaire ces apports sont suppléés par les apports marins en particulier dans les zones d'Upwelling (Nixon, 1995 ; De Jonge & al, 2002 ; Finkel & al, 2010). En effet, ces derniers peuvent apporter en milieu côtier des nutriments profonds en provenance des océans et de la fonte des glaces (Finkel & al, 2010).
- **Origine autochtone** par apports de nutriments en provenance de l'érosion des lits fluviaux (roselières, vasières, aménagements anthropiques...) ainsi que des interactions existantes entre les organismes au sein du milieu aquatique (phytoplancton, zooplancton...) et des réactions physico-chimiques pouvant libérer de la matière organique dans le milieu (re-largage de phosphore par les sédiments, par exemple) (De Jonge & al, 2002).

a. L'origine des nutriments

Éléments essentiels à la synthèse de nouveaux tissus végétaux, les trois éléments nutritifs majeurs susceptibles d'influencer la prolifération algale et principalement étudiés pour la maîtrise des phénomènes d'eutrophisation, sont **l'azote**, le **phosphore** et la **silice** (Robbe, 1975 ; Guillaud, 1983 ; Barroin, 2003).

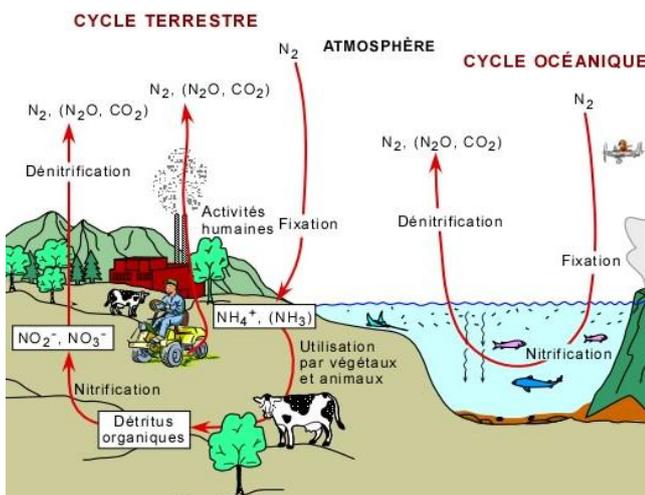


Figure 7 : Cycle terrestre et océanique de l'azote (source : Bourque, 2010)

L'azote - Élément absent de presque toutes les roches éruptives et métamorphiques, seuls les **systèmes sédimentaires** sont à même de fournir de l'azote (figure 7) (Vitousek & al, 2010). Dans le monde, les concentrations en N les plus élevées s'observent dans les cours d'eau drainant les bassins versants les plus importants : le Mississippi (3 238 000 km²) et le Yangtsé (3 349 000 km²) (Yin & al, 2001). Il est présent dans les milieux aquatiques sous différentes formes : **nitrates**, **nitrites**, **ammonium** et **azote organique** par l'intermédiaire de différents processus comme la **minéralisation** de la matière organique ou le **lessivage des sols** (Robbe, 1975), et sont variables en fonction des régions du monde ; avec cependant des taux élevés pour l'Europe, le Nord-est des Etats-Unis, l'Inde, le Pakistan, le Japon/Corée et les Caraïbes (Nixon, 1995). Les apports d'azote dans les milieux aquatiques sont majoritairement liés à la combustion des énergies fossiles, aux fertilisants agricoles ainsi qu'aux déjections du bétail, ces derniers étant tout deux épandus sur les terres (Yin & al, 2001 ; Vitousek & al, 2010).

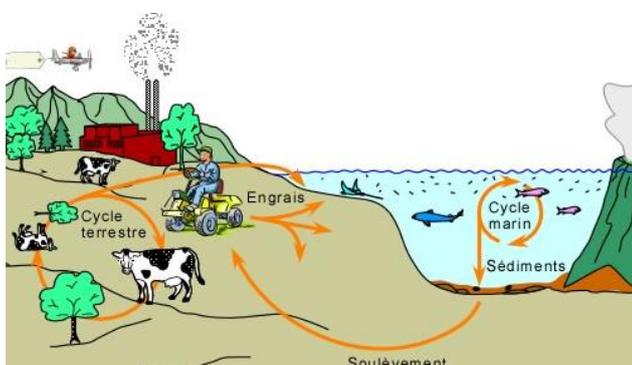


Figure 8 : Cycle terrestre et océanique du phosphore (source : Bourque, 2010)

Le phosphore - Contrairement à l'azote dont l'origine est essentiellement agricole et atmosphérique, le phosphore peut trouver son origine dans une multitude de sources (figure 8) (Vitousek & al, 2010). S'il peut également provenir des engrais, le phosphore en excès provient majoritairement des **eaux usées**, du lessivage des **aires urbaines** et des **émissions industrielles** (Carpenter, 2005). De plus, sa présence dans un grand nombre de roches et sa facilité d'accumulation dans les sols font qu'il se retrouve aisément dans le milieu aquatique par lessivage (Paerl, 1988 ; Carpenter, 2005 ; Vitousek & al, 2010). Entrant par les

précipitations et par l'exploitation minière, les flux annuels de phosphore varient entre 17,5 et 18,5 Tg.ans⁻¹ (Carpenter, 2005). Il est estimé que les flux mondiaux de phosphore apportés par les fleuves à la mer ont été multipliés par 3 depuis l'ère préindustrielle (XVIII^{ème} siècle) (Carpenter, 2005). En France, ces flux varient en fonction des fleuves (tableau 1) (Aminot & al, 1993) :

Tableau 1 : Flux annuels dans les grands fleuves français selon Aminot & al, 1993

Fleuve	Flux moyen annuel de phosphate sur la période 1988 - 1990
Seine	8 400 t soit 110t/km ² de bassin versant
Rhône	5 500 t soit 55t/km ² de bassin versant
Loire	3 200 t soit 28t/km ² de bassin versant
Gironde	1 600 t soit 23 t/km ² de bassin versant

Le silice - Troisième nutriment en lien avec les phénomènes d'eutrophisation, la silice provient essentiellement des sols et de l'**érosion des roches mères**, constituant ainsi le **seul élément** pouvant influencer les phénomènes d'eutrophisation, **qui ne soit pas d'origine anthropique** (Schindler, 2006 ; Trommer & al, 2012) et jouant un rôle non négligeable dans la régulation des populations de diatomées (la silice est indispensable à l'élaboration de leur frustule)(AELB, 2003 ; Flourey & al, 2012).

b. Les nutriments et les populations algales

Après presque 50 ans de débat sur le rôle des différents nutriments dans la production primaire (Smith & al, 2006) ; il est aujourd'hui établi que les **variations** de concentrations des **éléments principaux** (N, P, C, Si, Fe, etc.) ont un **impact** sur le **développement phytoplanctonique** et sur la **diversité des communautés** (Ornolfsdottir & al, 2004).

En milieu aquatique, les éléments nutritifs sont peu à peu extraits de l'eau par **photosynthèse** dans des proportions qui sont indispensables pour assurer la **croissance** et le **développement de la production primaire** (Redfield, 1960). Si l'azote permet surtout la synthèse protéique (Conley & al, 2009), le phosphore est essentiel à la synthèse d'ADN et d'ARN, ainsi qu'au transfert d'énergie (ATP) (Conley & al, 2009). Ce dernier est transféré dans les eaux de surface sous forme d'ions dissous directement assimilable par les végétaux ou sous forme associée via le phosphore particulaire (Barroin, 2007). C'est en période de crue que la part de phosphore particulaire est dominante, celui-ci pouvant devenir en partie, apte à fournir du phosphore biodisponible par rupture des liaisons ester (liaisons chimiques faibles dont la rupture nécessite peu d'énergie) (Carpenter, 2005 ; Barroin, 2007).

Cependant, en fonction de la biodiversité phytoplanctonique en place, la réponse aux apports nutritifs pourra être différente et sera **fonction** des **besoins** et de l'**affinité** des espèces pour certains nutriments (AELB, 2003). Ainsi, le mécanisme de la photosynthèse peut être impacté voire limité, par les variations de concentrations en nutriments (Esler & al, 2007). En effet, une diminution des teneurs de certains sels nutritifs peut avoir des conséquences sur les changements de communautés phytoplanctoniques, sur les processus de division cellulaire et de grossissement des cellules qui seront réduits dans le temps, ainsi que sur une diminution du développement et de la productivité, limitant ainsi l'expansion de la biomasse (Redfield, 1960). En eau douce, par exemple, une augmentation des concentrations en phosphore peut entraîner des changements communautaires sur les populations de diatomées au profit des cyanobactéries fixatrices d'azote (Finkel & al, 2010). Ce phénomène fut observé en Baie de Galveston (USA) avec une alternance de la dominance des populations de diatomées et de cyanobactéries fixatrices d'azote en fonction des variations de concentration en nutriments dans la Baie (Ornolfsdottir & al, 2004). Des expériences menées en eau douce sur l'espèce de chlorophycée, *Chlorella pyrenoidosa* montre une variation forte des rapports C/N/P en fonction des concentrations en sels nutritifs dans le milieu (tableau 3) (Redfield, 1960).

Tableau 2 : Evolution du rapport C/N/P en fonction des conditions du milieu, selon Redfield, 1960

Condition du milieu	Rapport C/N/P
Normal	47/5,6/1
Déficiência en P	231/30,9/1
Déficiência en N	75/2,9/1

De plus, l'introduction importante de nutriments dans le milieu peut induire la **croissance d'espèces r²** (Ornolfsdottir & al, 2004). Le fait que certaines espèces de phytoplancton utilisent un élément indispensable à la croissance dans

² Les espèces r regroupent les espèces dont le mode de reproduction et de développement est rapide avec une bonne capacité d'adaptation aux milieux instables ; elles sont opposées aux espèces K caractérisé par une durée de vie longue et une reproduction faible et tardive. La distinction entre les espèces r et K repose sur le modèle évolutif des stratégies de reproduction des espèces face à l'environnement élaboré en 1967 par R.MacArthur et E.O.Wilson.

des concentrations extrêmement faibles (voire indétectable) suggère que l'affinité du phytoplancton pour les éléments élémentaires est forte (Hecky, 1988). La modification du ratio N/P résultant d'un excès relatif des éléments azote/phosphore, peut avoir un impact non négligeable sur la biomasse phytoplanctonique ainsi que sur la composition des espèces (Yin & al, 2001). Une modification des ratios Si/P et Si/N aura surtout un impact sur les communautés de diatomées, la silice étant primordiale à leur développement (Ménèsquen & Dussauze, 2009 ; Abonyi & al, 2015). En Mer Noire, par exemple, l'augmentation des apports en azote et phosphore a modifié les rapports Si/N et Si/P induisant un changement des communautés phytoplanctoniques (Yin & al, 2001).

2.1.3. LES CONDITIONS DE L'EUTROPHISATION

a. Rapport élémentaire et déséquilibre du milieu

L'**eutrophisation** repose sur une **altération des rapports élémentaires** des écosystèmes aquatiques (Yin & al, 2001). En effet, la répartition des nutriments dans le milieu est caractérisée par les ratios N/P, P/Si et N/Si qui sont variables d'un écosystème à l'autre et qui sont fondamentaux pour le développement de la production primaire hétérotrophe (qui produit sa propre matière organique à partir d'éléments minéraux) (Yin & al, 2001 ; Ménèsquen & Dussauze, 2009 ; Abonyi & al, 2014). En système d'**eau douce** (lacs, rivières, fleuves, etc.) le ratio N/P peut varier entre 11/1 et 20/1 ; en comparaison, en 1988, ce ratio est estimé à 16/1 dans les océans et à 5/1 dans les effluents de stations d'épuration (Hecky, 1988).

Par définition, un **élément nutritif** devient **excessif** dans le milieu lorsque la **capacité naturelle de dégradation**, de **consommation** et d'**épuration** du milieu aquatique est trop **faible** par rapport au **taux d'enrichissement** du milieu (Sauriau, 1994). L'accumulation de ressources métaboliques dans le milieu aquatique sur un laps de temps court peut ainsi mener à une augmentation conséquente de la biomasse algale pouvant être à l'origine du dérèglement des équilibres en place, notamment dans les processus de dégradation de la matière organique et les interactions bactériologiques qui y sont liées (Nixon, 1995 ; Cloern, 2001 ; De Jonge & al, 2002 ; Esler & al, 2007). La stabilité d'un milieu peut parfois être impactée par sa « charge interne » caractérisée par un recyclage dans les sédiments de certains éléments (Carpenter, 2005). Il existe donc une relation complexe entre les apports externes de nutriments et les processus physico-chimiques propres à la masse d'eau (recyclage...) (Trommer & al, 2012).

Dans le cas d'une prolifération algale importante, le déséquilibre du milieu engendré peut être suffisamment important pour générer des modifications des conditions physico-chimiques du milieu pouvant impacter la biodiversité et les communautés phytoplanctoniques (Ménèsquen & al, 2001 ; De Jonge & al, 2002 ; Smith & al, 2006). En fonction des rapports C/N/P le développement de certaines espèces phytoplanctoniques peut être favorisé par rapport à d'autres (Redfield, 1960) et être à l'origine de changement de dominance algale (Ménèsquen, 2001). En eaux douces, ces changements peuvent être à l'origine d'une modification du rapport existant entre les espèces de diatomées, de dinoflagellés et de cyanobactéries ; ces dernières pouvant être toxiques et à l'origine d'une possible dégradation de la structure et du fonctionnement du réseau trophique lorsqu'elles sont en mesure de dominer le peuplement algal (Guillaud, 1983 ; Barroin, 2003). En estuaire et en milieu côtier, la dystrophie peut être générée par l'augmentation massive de la production primaire, et favoriser le développement d'algues opportunistes comme les macrophytes (*enteromorpha sp.*, *ulva sp.*) ou le développement de nouvelles espèces phytoplanctoniques tels que des dinoflagellés (De Jonge & al, 2002).

b. Notion de facteur limitant

Le **concept de facteur limitant émerge au XIX^{ème} siècle**, lorsque l'Europe doit faire face à la diminution de la production agricole et à l'augmentation en parallèle de la population ; avec des recherches agro-alimentaires qui sont lancées pour augmenter les rendements par utilisation de fertilisants (Barroin, 2004). Ce nouveau concept donne naissance à la « loi du minimum » qui indique que la croissance et le **développement autotrophe** est **dépendant des éléments disponibles** en quantité **minimale** par rapport à leur besoin (Barroin, 2004). D'une manière générale, la **biomasse phytoplanctonique** peut être **limitée** par un **nutriment** lorsque celui-ci est présent en

concentration trop faible par rapport aux autres nutriments, également présents dans le milieu (Yin & al, 2001). Il est communément admis que le **phosphore (P)** est **limitant** dans les **systèmes d'eaux douces** et que **l'azote (N)** l'est historiquement en **milieu marin**, même si cette dernière affirmation est récemment remise en cause par la communauté scientifique (Hecky, 1988 ; Yin & al, 2001 ; Esler & al, 2007). En milieu estuarien, zone de transition entre les milieux fluvial et marin, il est aisé de comprendre que la définition du facteur limitant est un exercice complexe qui sera fonction des paramètres spatio-temporels (Hecky, 1988 ; Aminot & al, 1993). En 1970, Schindler établit que P est l'élément limitant l'eutrophisation sur le long terme dans les lacs et sera à la base de l'ensemble des réglementations de diminution des apports de P dans les estuaires (Conley & al, 2009). Cependant, selon les écosystèmes, les facteurs limitant varient selon les apports en nutriments et selon la période de l'année. De ce fait, en dehors des éléments P et N, d'autres nutriments tels que la silice (Si) ou le carbone (C) peuvent parfois être limitants (Berland & al, 1979). Le delta du Rhône par exemple, voit son facteur limitant changé au cours des saisons passant alternativement du phosphore, à l'azote mais aussi par le fer (Berland & al, 1979). En condition naturelle, du fait de son abondance relative, N ne pourra être considéré comme facteur limitant que si le ratio N/P < 7 (Barroin, 2007). Un ratio N/P > 10 témoignera lui, d'une limitation du développement végétal par le P (Barroin, 2007). En 1975, l'expérience de Droop a montré que les teneurs intra-cellulaires du phytoplancton pouvaient être déterminantes dans la définition du facteur limitant en dehors des concentrations du milieu (Berland & al, 1979).

La détermination du facteur limitant peut se faire par différents moyens : mesure de la biodisponibilité d'un élément, mesure des dépenses énergétiques pour l'assimilation d'un élément nutritif, mesure des concentrations tissulaires et des ratios N/P (Vitousek & al, 2010). Les éléments qui vont favoriser la croissance phytoplanctonique sont tellement divers que la maîtrise de l'eutrophisation ne peut se faire par action sur un seul facteur limitant (Berland & al, 1979).

c. L'influence de la climatologie

Si la climatologie peut favoriser l'émergence de blooms par apports d'éléments nutritifs d'origine atmosphérique ou terrigène, des conditions climatiques exceptionnelles comme des précipitations faibles ou une baisse excessive des températures peuvent *a contrario*, limiter l'expression de l'eutrophisation (Cloern, 2001). Les **changements hydrologique** et **thermique** liés aux variations climatologiques peuvent **modifier** les **paramètres chimiques** de la colonne d'eau (pH, température) et ainsi affecter un grand nombre de **processus** comme la **photosynthèse**, la dissolution des gaz dans l'eau, la cinétique des solutés et des polluants, ou l'évaporation (Paerl, 1988 ; AELB, 2003 ; Floury & al, 2012). De plus, les variations de débit liées aux conditions météorologiques peuvent avoir un impact sur la dynamique fluviale et sur les flux qui seront importants dans la régulation de la diversité et de l'abondance des espèces (Floury & al, 2012). L'ensoleillement est également un paramètre physique important, la production primaire annuelle étant, dans les estuaires, plus fortement corrélée à la ressource lumineuse que nutritive (Cloern, 2001). Plus généralement, la lumière est indispensable à la photosynthèse, et de ce fait, certaines espèces de phytoplancton sont capables de s'adapter à des variations du régime lumineux par augmentation/diminution du taux de chlorophylle *a* dans leurs cellules, dans le but de poursuivre leur développement (Ornolfsdottir & al, 2004).

2.1.4. LES PROCESSUS LIES A L'EUTROPHISATION

a. L'autorégulation phytoplanctonique

Pour que les espèces persistent dans le temps, leur taux de croissance cellulaire se doit d'être supérieur aux différentes pertes que peuvent subir ces populations (Hecky, 1988). La limitation du développement phytoplanctonique sera donc fonction de la biomasse algale comme démontré par Reynolds en 1984 :

$$\frac{dN}{dt} = K'N - KwN - KsN - KdN - KgN \text{ soit } Nt = N_0 e^{(K' - Kw - Ks - Kd - Kg)t} \text{ où } N \text{ représente la biomasse phytoplanctonique,}$$

t le temps et *N₀* la biomasse algale à *t₀*.

Les valeurs de K sont liées aux apports et aux pertes de biomasse par les communautés phytoplanctoniques : K' représente la croissance cellulaire qui doit excéder ou au moins égaler les pertes par dilution (Kw), par sédimentation (Ks), par mort physiologique (Kd) et par « broutage » (Kg) (Hecky, 1988).

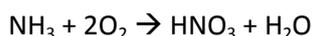
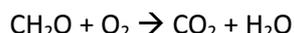
Les **relations entre individus** vont avoir un **rôle essentiel** dans le **développement phytoplanctonique** à travers les processus de compétition inter et intra-spécifique pour les éléments nutritifs pouvant favoriser, dans certains milieux, le développement d'espèces plus **compétitives** (Floury & al, 2012). Associés à cela, la capacité migratoire des dinoflagellés dans la colonne d'eau et leur capacité de regroupement, leurs permettent de consommer un stock de nutriments élargi pouvant influencer l'émergence de blooms de manière très localisée (Le Corre & al, 1992).

b. L'interaction azote-phosphore

Dans le milieu aquatique, les éléments nutritifs sont sujets à de **nombreuses interactions**. En effet, de fortes concentrations en phosphore vont pouvoir stimuler le processus de fixation de l'azote d'origine bactérienne ou algale et peut être à l'origine de son augmentation (Barroin, 2004 ; Barroin, 2007). En Mer Baltique par exemple, les excès de phosphore dans l'eau vont favoriser le développement de certaines cyanobactéries N₂-fixatrices qui vont ainsi augmenter les concentrations d'azote à la surface de l'eau (Conley & al, 2009). Réciproquement, l'addition d'azote dans le milieu aquatique peut amener certains organismes à produire plus d'enzymes « phosphatase » extracellulaires dont l'action peut libérer du phosphore biodisponible dans le milieu. Cependant, ces deux actions ne sont pas symétriques ; si P permet l'augmentation des quantités de N dans l'écosystème, l'action de N favorise uniquement la biodisponibilité de P déjà présent dans le milieu (Vitousek & al, 2010).

c. Les crises d'anoxie et la mortalité piscicole

Description du phénomène – En période diurne, grâce à la **photosynthèse**, les **blooms phytoplanctoniques** peuvent contribuer à une **bonne oxygénation** des eaux (DDASS, 1990). Cependant, la mort de tout ce phytoplancton constitue une grande quantité de **matière organique** qui, lors de sa **dégradation**, sera très **consommatrice en oxygène** (DDASS, 1990). Ce processus peut être à l'origine d'une chute brutale des teneurs en oxygène dissous (O_{2dissous}) générant ainsi des **phénomènes d'hypoxie**, voire d'**anoxie** dans le milieu (Foussard & Etcheber, 2011).



L'oxydation de la matière organique selon Redfield, 1960

Ces phénomènes de déficit en oxygène dissous dans le milieu peuvent avoir des conséquences dramatiques sur les niveaux trophiques supérieurs, en particulier sur les communautés piscicoles (De Jonge, 2002 ; Foussard & Etcheber, 2011) ; qu'elles soient benthiques ou démersales (Rybarczyk & al, 1995). Ces diminutions des concentrations en oxygène dissous furent à l'origine des **mortalités piscicoles** à répétition qui furent observées fin des années 1970, début des années 1980 en Baie de Somme, pour des taux de saturation en oxygène dans l'eau inférieur à 65% (tableau 3) (Rybarczyk & al, 1995).

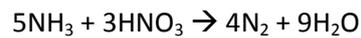
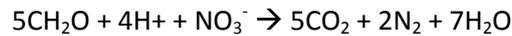
Tableau 3 : Valeur seuil du taux de saturation en oxygène dissous pour différentes populations piscicoles selon Rosenberg & Loo, 1988 ; Thimel, 1988

Type de population piscicole	Taux de saturation en oxygène dissous (valeur seuil)
Population démersale	>70%
Population benthique	>30%

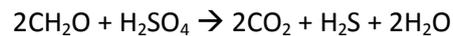
En **milieux estuarien** et **côtier**, ces **déficits en oxygène** dissous peuvent être **favorisés** par des conditions physiques particulières comme la **géomorphologie**, l'influence des **ondes de marée** ou encore le **brassage des vents** (Ménèsquen, 2001) ou la **stratification des eaux** (Rybarczyk & al, 1995). Les conséquences sur les populations piscicoles peuvent être variables en fonction des espèces et de l'importance des crises anoxiques : diminution des espèces les moins résistantes, disparitions temporaires ou définitives du milieu de certaines espèces... (Rybarczyk & al, 1995). En condition anoxique, la dégradation de la matière organique peut se poursuivre par l'intermédiaire de

processus non consommateur d'oxygène, dit anaérobie avec des éléments sulfates, nitrates, nitrites et dioxyde de carbone qui serviront d'accepteur final à la place de O₂ (Redfield, 1960).

Les processus biochimiques en conditions anoxiques – C'est environ entre 25 et 50% de la **matière organique** végétale produite dans la colonne d'eau qui **sédimente** et qui est **minéralisée** par des **processus aérobie et anaérobie** (De Jonge & al, 2002). L'oxydo-réduction étant la réaction préférentielle en condition aérobie, les éléments utilisés prioritairement pour la **minéralisation** de la matière organique sont O₂ > NO₃⁻ > SO₄⁻ (Redfield, 1960). En condition anaérobie, la minéralisation de la matière organique sera donc réalisé à partir des éléments NO₃⁻ et SO₄⁻ au travers des processus de **dénitrification** et de **sulfato-réduction** (Redfield, 1960 ; De Jonge & al, 2002) :



La dénitrification selon Redfield, 1960



La sulfato-réduction selon Redfield, 1960

2.1.5. LES PARAMETRES FAVORISANT L'EUTROPHISATION

En dehors des apports en nutriments, il existe beaucoup de **facteurs favorisant** qui sont à prendre en compte dans le processus d'eutrophisation (Le Corre & al, 1992). Ils sont issus d'une gamme de **mécanismes physiques, biologiques, chimiques, morphologiques, climatiques** etc. favorisant le développement phytoplanctonique par **modification des conditions physico-chimiques** du milieu ou par **concentration locale** d'un grand nombre de cellules phytoplanctoniques et de sels nutritifs (Le Corre & al, 1992 ; Descy & al, 2012). En effet, des études menées en Baie de San Francisco (USA) et de Brest (France), ainsi que dans l'estuaire Ythan (Ecosse), ont montré que l'élévation des concentrations en nutriments sur des décennies, n'étaient pas obligatoirement corrélée à une augmentation du phytoplancton.

Les populations biologiques – Compte tenu de leur capacité de mouvement, les organismes mobiles pélagiques et benthiques, tels que les poissons, peuvent, à l'échelle locale, générer des courants et remettre en suspensions des sédiments superficiels, rendant ainsi des nutriments accessibles aux communautés phytoplanctoniques (Schindler, 2006).

Les conditions physiques, chimiques et géomorphologiques – Pour la majorité des systèmes présentant des conditions de faibles débits associés à des **mécanismes de favorisation** de la **sédimentation** (rencontre eaux douces/eaux salées par exemple), un minimum d'apport en sels nutritifs suffit à rendre le milieu sujet à l'eutrophisation (De Jonge & al, 2002). L'apparition de prolifération algale pourra être favorisée par les conditions physiques du milieu qui vont conditionner le transport horizontal (de l'amont vers l'aval) des éléments nutritifs et leur temps de résidence dans la masse d'eau (Cloern, 2001 ; Schindler, 2006). Pour les estuaires, ce transport horizontal est fonction d'une multitude de **caractéristiques physiques et géomorphologiques** tels que la pente des surfaces intertidales, le vent, l'onde de marée etc. (Cloern, 2001 ; De Jonge & al, 2002).

Les aménagements et ouvrages hydrauliques – En dehors des apports nutritifs liés aux activités humaines précisées précédemment, la majorité des cours d'eau du monde sont impactés par des **aménagements** (Cloern, 2001 ; Floury & al, 2012). En effet, environ 80% du débit des grands fleuves situés dans la zone tempérée nord sont affectés par des installations humaines tels que des barrages, des canaux, des réservoirs d'irrigation (Cloern, 2001), pouvant directement **altérer la qualité des eaux** et **favoriser la rétention de matière organique** dans des secteurs très localisés (Floury & al, 2012). De plus, certains aménagements, comme les barrages vont pouvoir impacter les variations de débit saisonnier pouvant générer une modification des conditions chimiques du milieu et de la capacité d'assimilation des nutriments dans les estuaires (Cloern, 2001).

2.1.6. CONSEQUENCES ECONOMIQUE ET PERCEPTION DE L'EUTROPHISATION

Les manifestations de l'eutrophisation qu'elles aient lieu en eaux douces, en estuaires ou en milieux côtiers se traduisent par des **nuisances** qui peuvent être, selon Cloern (2001), divisées en trois catégories :

- Détérioration de la qualité de l'eau et des milieux
- Danger sanitaire chronique ou intermittent
- Perte de l'esthétisme et des valeurs récréatives (Cloern, 2001)

Niveau 1 : Détérioration de la qualité de l'eau et des milieux – L'eutrophisation va dans un premier temps générer une **altération** des **conditions physico-chimiques** de l'eau en particulier à travers la **désoxygénation** de la masse d'eau lors de la **décomposition** de la **matière organique** qui suit un bloom (Cloern, 2001). L'impact biotique qui en résulte est une mortalité des espèces situées plus en amont dans la chaîne trophique, à commencer par le zooplancton (DDASS, 1990 ; Cloern, 2001). Enfin, l'effet le plus visible de la détérioration de la qualité des milieux s'observe sur les populations piscicoles et en particulier pour les espèces migratrices amphihalines (Marchand & al, 1997).

Niveau 2 : Danger sanitaire chronique ou intermittent – Les milieux enrichis en éléments nutritifs peuvent également favoriser l'émergence d'**espèces toxiques** comme c'est le cas de certaines espèces de cyanobactéries en eaux douces ou de dinophycées comme *dinophysis sp.* en estuaire et en milieu côtier (Cloern, 2001). Filtrées par les organismes dulçaquicoles et côtiers benthiques, ces derniers peuvent devenir impropres à la consommation humaine du fait de leur toxicité (Paerl, 1988 ; Cloern, 2001). En milieu strictement fluvial, le développement phytoplanctonique peut également avoir un impact sur le mécanisme de potabilisation de l'eau. La mobilisation des éléments chlorés lors de la minéralisation de la matière organique et le développement des certaines espèces cyanobactéries modifiantes des propriétés organoleptiques de l'eau (émission de métabolites dans l'eau) peuvent influencer le goût de l'eau (DDASS, 1990).

Niveau 3 : Perte de « l'esthétisme » et des valeurs récréatives – Les manifestations de l'eutrophisation peuvent également être à l'origine de différentes **aménités citoyennes** (Crouzet, 1983). La première concerne les pertes financières liées aux coûts de purification des eaux pour les usages anthropiques ou aux mortalités piscicoles pour les communautés de pêcheurs (Carpenter, 2005). La diminution des activités récréatives liées à la diminution de la qualité des eaux de baignades en période d'eutrophisation constitue également une aménité (Paerl, 1988 ; Carpenter, 2005). Enfin, ces pertes peuvent également concerner les **services écosystémiques** rendu par certaines espèces endémiques qui vont disparaître temporairement ou définitivement en fonction de la fréquence et de la durée des phénomènes d'eutrophisation (Carpenter, 2005). Le secteur du **tourisme** peut également être impacté par les proliférations algales avec des eaux pouvant devenir rouges, vertes, écumeuses, nauséabondes (Paerl, 1988). Dans une moindre mesure, les blooms algaux peuvent également susciter des dysfonctionnements des aménagements hydrauliques par colmatage des puits filtrants ou par encrassement des machines (Crouzet, 1983 ; Paerl, 1988).

2.2. Le cas particulier des estuaires

Les estuaires sont des **aires de mélanges** complexes situées à l'**interface** entre les **eaux douces** et l'**environnement marin** (Saliot & al, 1984 ; Kennedy, 1986), où s'observe un mélange vertical de la **colonne d'eau** par densité (Yin & al, 2001). Les changements hydro-biologiques vont favoriser une stratification thermique de la masse d'eau avec des espèces phytoplanctoniques qui vont se répartir sur le gradient amont-aval en fonction de leur préférence thermique et calorifique (Paerl, 1988 ; AELB, 2003). Les estuaires constituent des **surfaces de transition** jouant un rôle de filtre pour la matière dissoute et particulaire ainsi que de l'ensemble des composants qui leurs sont associés (De Jonge & al, 2002). Ils peuvent ainsi être considérés comme des réceptacles réactifs avec de fortes capacités d'assimilation de la matière organique (De Jonge & al, 2002).

Les estuaires sont caractérisés par des processus de déplacements et de recyclages de nombreuses espèces chimiques minérales, organiques et organo-minérales à travers 3 interfaces : air/eau, eau/sédiments et eaux douces/eaux salées (Saliot & al, 1984).

Globalement, les **apports en nutriments** ont augmenté au cours de ces dernières décennies (Paerl & al, 1998 ; De Jonge & al, 2002) : les **teneurs en azote** ont **augmenté** de près de **30%** dans la majorité des estuaires américains sur la période 1970-1990 (Paerl & al, 1998). Parmi les estuaires et écosystèmes côtiers qui bénéficié de programmes de suivi à long terme, la disponibilité en azote et en phosphates a significativement augmenté sur la période 1990 - 2000 (Cloern, 2001). Ces éléments peuvent cependant être potentiellement restitués à la colonne d'eau, comme c'est le cas dans le Golfe du Venezuela (Redfield, 1960). En effet, dans ce Golfe, les eaux chargées en phosphore en provenance du bassin versant de Maracaibo sont entraînées en profondeurs au contact des eaux salées où les échanges eau/sédiments seront élevés avec un possible stockage des éléments P (Redfield, 1960).

Le **bouchon vaseux** forme la zone de **turbidité élevée** observable dans l'estuaire et résulte des décalages existant entre la vitesse de déplacement d'une particule en suspension et de la vitesse d'écoulement des eaux ainsi que du décalage spatial existant entre le lieu où débute la sédimentation particulaire et le lieu où la particule atteint le fond (Gallenne, 1974). La floculation résultant du mélange entre les eaux douces et salées participe à l'augmentation de la turbidité du bouchon vaseux dont la formation sera à l'origine des conditions réductrices du milieu (Gallenne, 1974 ; Barroin, 2003). Dans cette zone, les espèces phytoplanctoniques en provenance de l'amont vont, soit mourir au contact des eaux salées et contribuer ainsi à l'augmentation de la matière organique à minéraliser dans le système, soit être limitées dans leur croissance et leur développement par réduction de la photosynthèse (Ottman, 1986 ; Foussard & Etcheber, 2011).

2.3. Suivi de l'eutrophisation sur le long terme : Cas de la Loire (France)

La **première étude phytoplanctonique** en Loire date de **1928** et fait état d'une très faible quantité de **phytoplancton**, au regard des concentrations moyennes actuelles, avec une partie aval du fleuve (en aval de Nantes) qui ne compte que quelques milliers de cellules phytoplanctoniques par litre d'eau correspondant à des teneurs avoisinant les 1µg/L de chlorophylle *a* selon les calculs de l'auteur (Crouzet, 1983).

Selon un grand nombre d'auteurs, les **grands fleuves français**, telle que la Loire et la Seine, deviennent eutrophisés à partir des **années 1970-1980** (Lair, 2001 ; Larroude & al, 2013). En 1981, la qualité de l'eau de la Loire n'atteint pas les objectifs fixés par les comités de bassin en raison de ces trop fortes teneurs en matières organiques et est classée médiocre ; en cause les rejets industriels selon une étude de Guillaud en 1983 (Guillaud, 1983 ; DDASS, 1990).

Selon une étude de Vinconneau & al (1990) les événements d'eutrophisation en Loire ne seraient pas antérieurs à 1960, des affirmations qui sont en contradiction avec les observations de Crouzet qui, en 1983, rapportent les premiers travaux sur la Loire antérieurs à 1960 et qui, sans parler d'eutrophisation, fait état de teneurs en chlorophylle *a* supérieures à 200µg/L (Crouzet, 1983 ; Vinconneau, 1992). En 1987, seule la Loire est considérée comme une zone sensible à l'eutrophisation par le Ministère de l'environnement. En 1994, cette zone sensible s'étend à la partie Nord du bassin versant de la Loire uniquement avec des concentrations en sels nutritifs en Loire qui sont hypothétiquement régis par deux phénomènes : les teneurs en sels nutritifs dans les eaux douces du fleuve à l'entrée de l'estuaire ; les apports de l'agglomération nantaise (Barroin, 2003).

Cependant, depuis ces cinquante dernières années, la Loire subit de nombreuses pressions anthropiques parmi lesquelles une forte augmentation des teneurs en nutriments souvent liés aux effluents domestiques et agricoles (Larroude & al, 2013).

2.3.2. SPECIFICITES DES PARAMETRES DE L'EUTROPHISATION EN LOIRE

a. La biomasse algale

En 2011, Descy et son équipe atteste que la Loire possède sur tout son linéaire la plus **grande diversité phytoplanctonique** de France et, probablement même de l'ensemble des **cours d'eau européens** (Descy & al, 2011). Avec un maximum de 84 taxons par échantillons et près de **623 taxons** identifiés en Loire par Descy & al, les indices de Shannon-Weaver³ oscillent selon les études et les auteurs entre *a minima* 0,34 et 1,28 et entre 5,37 et 5,78 *a maxima* (Descy & al, 2011 ; Abonyi & al, 2012). Sur l'ensemble des taxons, les espèces majoritairement représentées sont les **chlorophycées** et les **diatomées** (Descy & al, 2011). Il est également possible de trouver, en moindre quantité, des **dinoflagellés** et des **cyanobactéries** (Abonyi & al, 2012 ; Abonyi & al, 2014). D'un point de vue spécifique, plusieurs espèces (chlorophycées et diatomées en majorité) contribuent de manière significative à l'augmentation des teneurs en chlorophylle *a* en Loire : *Cyclotella meneghiniana*, *Cyclostephanos dubius*, *Skeletonema potamos*, *Fragilaria crotonensis*, *Chlorococcalean algae*, *Scenedesmus armati*, *Scenedesmus desmodesmus*, *dichotomococcus curvatus*, *Dictyosphaerium spp*, *Oocystis spp*, *Ankyra juday*, *Didymocystis sp*, *Diplochlois sp* (Abonyi & al, 2012), *Melosira ambigua* (SMN, 1989) etc.

Cependant, au cours de ces 25 dernières années, les communautés phytoplanctoniques ont changé et ont subi un net déclin à partir de 1994, avec une **diminution de l'abondance** des espèces estimées à 50 %. Il en est de même pour les variations spécifiques interannuelles qui ont diminué au profit des communautés de cyanobactéries, et qui, de façon ponctuelle et en conditions optimales pour leur développement, peuvent représenter 60 % de la communauté phytoplanctonique totale (Larroude & al, 2013). Les concentrations maximales de biomasse phytoplanctonique peuvent être observées par **deux pics** en **mai** et **août**, pouvant être suivis d'un **pic tardif** au mois d'**octobre** (1985, 1988, 1989, 1990 et 1995) témoignant d'une grande diversité des cycles physiologiques des espèces présentes en Loire (Abonyi & al, 2014 ; Minaudo & al, 2015).

b. Les éléments nutritifs

Le phosphore en Loire – Le phosphore est présent dans les eaux de la Loire par l'intermédiaire d'apports diffus estimés en 1990 à : 10 - 20 % agricole ; 30 - 40 % industrielle ; 50 - 60 % domestique, en moyenne pour le bassin versant de la Loire (DDASS, 1990 ; Sauriau, 1994). Globalement, les **phosphates** ont **diminué** sur **tout le linéaire** de la Loire au cours de ces 30 dernières années (Minaudo & al, 2013). Après une augmentation progressive pendant les années 1980 - 1990, les teneurs en phosphates ont tendance à diminuer depuis les années 1995 d'environ 4 µg par an probablement du faite des nombreuses actions et mesures prises à l'échelle nationale (cf. partie 2.2) (Minaudo & al, 2013 ; Minaudo & al, 2015). L'étude de la répartition spatio-temporelle du phosphate en Loire met en avant une variabilité saisonnière avec des concentrations maximales qui sont atteintes en été (Minaudo & al, 2015).

L'azote en Loire – En contraste avec les teneurs en phosphates qui ont tendance à diminuer en Loire moyenne (amont de Montjean-sur-Loire), les teneurs en **azote augmentent légèrement** depuis les années 1995, et ce malgré l'application de la Directive « Nitrates » (Minaudo & al, 2013). En effet, les concentrations hivernales d'azote augmentent progressivement sur le bassin avec une moyenne des concentrations en nitrates qui augmente d'environ 0,3µg/L par an depuis les années 1980. A l'inverse, les concentrations estivales en nitrates sont relativement faibles au regard des moyennes annuelles avec un minimum de nitrates relevé en Loire en 1980 pour une concentration de 0,4mg/L (Minaudo & al, 2013 ; Minaudo & al, 2015). La légère tendance à l'augmentation des nitrates peut être expliquée par la réponse tardive de l'environnement aux différentes mesures qui sont appliquées sur le bassin, ainsi que par l'apport en nutriments par des sources diffuses issues du lessivage des sols ; avec une forte relation existante entre les concentrations hivernales en nitrates et la proportion des terres agricoles sur le bassin versant (Minaudo & al, 2015).

La silice en Loire - Tout comme le phosphore et l'azote, la **silice** est présente sur tout le linéaire de la Loire sous forme de **silicates**, toute l'année avec des concentrations bien plus élevées que les autres cours d'eau français au

³ Indice de Shannon-Weaver : Indice permettant d'estimer la diversité d'un milieu selon la formule : $H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$, avec *S*, le nombre total d'espèces ; *p_i* = la fréquence relative des espèces *n_j/N* ; *n_j*, la fréquence relative de l'espèce *j* dans l'unité d'échantillonnage ; *N* la somme des fréquences relatives spécifiques. Un indice *H'* élevé témoignant d'une grande diversité (Shannon & Weaver, 1949).

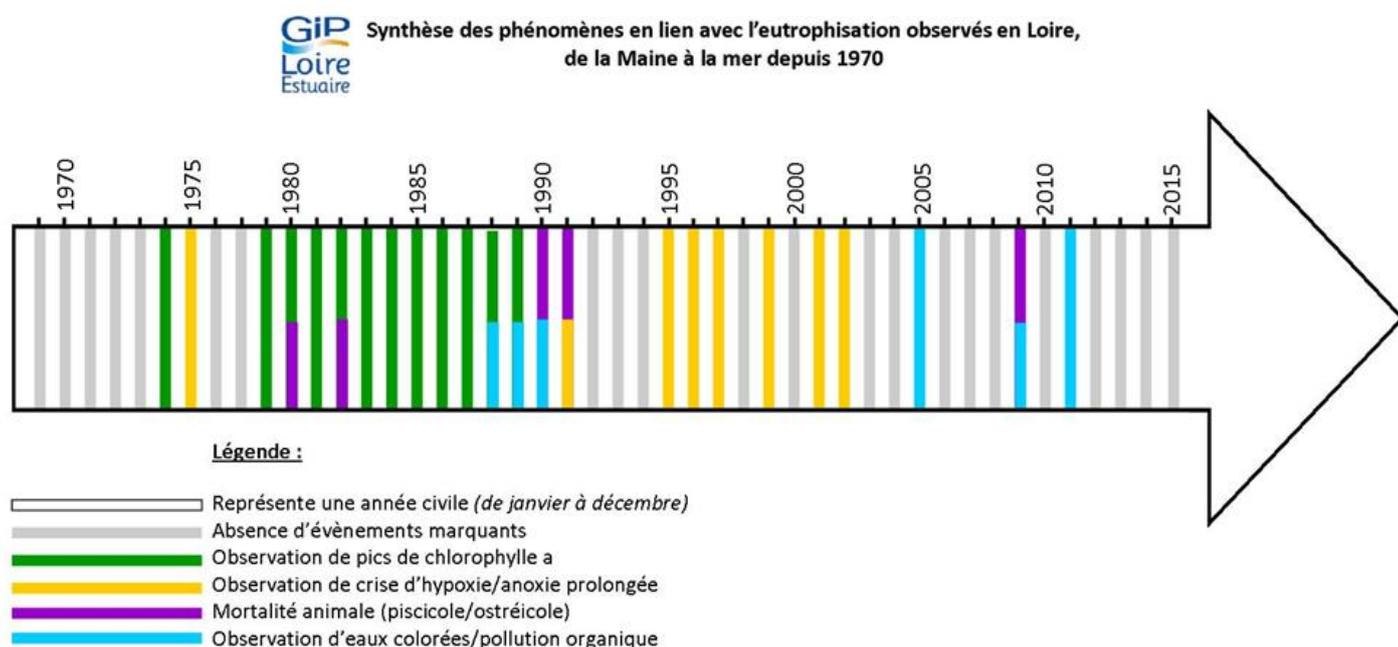
regard de la nature géologique du bassin de la Loire (Rincé & al, 1985). Dans l'estuaire et selon le modèle de Waden élaboré par Van Bennekom & Al en 1974, les vasières latérales seraient susceptibles d'enrichir les eaux de fond par minéralisation des sédiments superficiels (Rincé & al, 1985).

En Loire, un **ratio N/P < 14** fera état d'un système qui est **potentiellement limité** par l'**azote** alors qu'un **ratio N/P > 16** sera **limité** par le **phosphore** ; entre 14 et 16 le système sera potentiellement considéré comme présentant suffisamment d'élément biodisponible à la production primaire ou co-limité par l'azote et le phosphore (Minaudo & al, 2015). Ces sels nutritifs sont soumis aux conditions hydrologiques et leurs concentrations varient avec le débit du fleuve (CSEEL, 1984). En 2012, les apports de nitrates à l'estuaire furent estimés à environ 350 000 t pour environ 2800 t de phosphore (GIP Loire Estuaire, 2013).

2.3.3. INVENTAIRE DES EVENEMENTS D'EUTROPHISATION EN LOIRE DEPUIS 1970, DE LA MAINE A LA MER

Nonobstant les nombreuses études menées sur l'eutrophisation, les événements ponctuels décrits précisément par paramètres et par secteur géographique sont très peu nombreux. Dans la littérature grise inventoriée, le **premier phénomène d'eutrophisation** décrit en Loire date du **24 juillet 1974** et fait état d'une « pollution grave » avec des teneurs en chlorophylle *a* qui avoisinent les **175 µg/L** (Crouzet, 1983). Les événements suivants ne seront décrits qu'en 1983 dans une étude « la qualité des eaux dans l'estuaire de la Loire » menée par Guillaud en 1983 (Guillaud, 1983).

L'étude des différentes références existantes en Loire sur l'emprise géographique du GIP Loire Estuaire révèle que la décennie 1980 fut marquée par de nombreux phénomènes d'eutrophisation avec de nombreux pics de chlorophylle *a* observés en périodes printanière et estivale. Le début de la décennie est également marqué par d'importants phénomènes de mortalité piscicole qui sont probablement dus aux crises d'hypoxie voire d'anoxie qui peuvent faire suite à un phénomène d'eutrophisation. La période 1989-1992 fut marquée par des conditions d'étiage sévère induisant des faibles débits en Loire, probablement à l'origine des nombreux pics de chlorophylle *a* qui furent observés en période estivale et sur les mois de septembre et d'octobre. Contrairement à la décennie 1980, dont les phénomènes d'eutrophisation sont relativement bien décrits, l'étude des phénomènes d'eutrophisation sur les années 1990-2000 fait surtout état de crises d'hypoxie et d'anoxie qui peuvent suggérer une eutrophisation. Les événements sont moins décrits dans la littérature grise à partir des années 2000, avec des études et des publications scientifiques qui se veulent plus généralistes (figure 9, tableau 4).



Sources : Crouzet., 1983 ; Guillaud., 1983 ; DDASS., 1990 ; Sournia & al., 1992 ; ACEL., 1994 ; Sauriau., 1994 ; Barroin., 2003 ; GIP Loire Estuaire

Figure 9 : Frise de synthèse des évènements d'eutrophisation en Loire selon la littérature grise

Tableau 4 : Tableau de synthèse des événements recensés en Loire depuis 1970

Année	Période d'observation	Chlo a [$\mu\text{g/L}$]	Localisation	Description du phénomène	Commentaire [mg/L]	Source	Typologie
1974	24/07/1974	175	Loire aval	Loire en état de « pollution grave »		Crouzet, 1983	Article de revue
1979	Juillet	150	Sainte-Luce-sur-Loire	Etude révélant des pics de chlorophylle a	NO_3 [5] ; PO_4^{3-} [< 0] ; SiO_3 [6]	Guillaud, 1983	Rapport du CSEEL
	Octobre	140			NO_3 [5] ; PO_4^{3-} [< 0] ; SiO_3 [7]		
1980	Juin	225	Sainte-Luce-sur-Loire	Etude révélant des pics de chlorophylle a	NO_3 [5] ; PO_4^{3-} [< 0] ; SiO_3 [2]	Guillaud, 1983	Rapport du CSEEL
	Juillet	240					
	Septembre	150			NO_3 [4] ; PO_4^{3-} [< 0] ; SiO_3 [2]		
1981	Mai	361	Sainte-Luce-sur-Loire	Etude révélant des pics de chlorophylle a	NO_3 [12] ; PO_4^{3-} [< 0] ; SiO_3 [6]	Guillaud, 1983	Rapport du CSEEL
	07/08/1981	350					
	Octobre	100	Nantes				
1982	06/08/1982	220	La Possonnière	Etude révélant des pics de chlorophylle a		Barroin, 2003	Article de revue
	Juin		Saint-Nazaire	Observation d'eaux colorées vertes		Ménesguen & al, 2001	Rapport Ifremer
	Juin	200	Sainte-Luce-sur-Loire	Etude révélant des pics de chlorophylle a		DDASS, 1990	Rapport d'étude
1983	Août	240					
	Juillet	160	Sainte-Luce-sur-Loire	Etude révélant des pics de chlorophylle a		DDASS, 1990	Rapport d'étude
1984	Juillet	210	La Possonnière	Etude révélant des pics de chlorophylle a		DDASS, 1990	Rapport d'étude
		225	Montrelais				
	Août	220	Ponts-de-Cé				
		200	Sainte-Luce-sur-Loire				
		100	Saint-Nazaire				
1985	Juillet	200	La Possonnière	Etude révélant des pics de chlorophylle a		DDASS, 1990	Rapport d'étude
		Août			290		
	Eté	319	Le Brivet				
		250	Mauves-sur-Loire				
		290	Montrelais				
		300	Ponts-de-Cé				
300	Sainte-Luce-sur-Loire						
1986	Eté	110	Mauves	Etude révélant des pics de chlorophylle a		DDASS, 1990	Rapport d'étude
		190	Montrelais				
		220	Ponts-de-Cé				
		110	Saint-Nazaire				
		215	Sainte-Luce-sur-Loire				
	10/1986	200	Sainte-Luce-sur-Loire		Oxygène dissous [18]		
1987	Eté	197	Le Brivet	Etude révélant des pics de chlorophylle a		DDASS, 1990	Rapport d'étude
		200	Montrelais				
		240	Ponts-de-Cé				
		245	Sainte-Luce-sur-Loire				
	Octobre	250	Sainte-Luce-sur-Loire		Oxygène dissous [16]		
		180	Sainte-Luce-sur-Loire		Oxygène dissous [14]		
1988	Eté	130	Sainte-Luce-sur-Loire	Etude révélant des pics de chlorophylle		ACEL, 1994	Rapport d'étude
	Août		Saint-Nazaire	Efflorescences de Gymnodinium	40.10^6 cellules/L	Saurnia & al, 1992	Publication
1989	08/10/1989		Ile beaulieu et Trentemoult	Observation d'eaux colorées		AELB, 2003	Rapport d'étude
	Eté	152	Mauves	Etude révélant des pics de chlorophylle a		DDASS, 1990	Rapport d'étude
		151	Montrelais				
			Ponts-de-Cé	Pollution d'origine organique			
1990	07-08/1990		Saint-Nazaire	Pollution au DSP		AELB, 2003	Rapport d'étude
2005	08/09/2005		Saint-Nazaire	Arrêté d'interdiction de pêche à pied	Phytoplancton toxique	Archives de presse GIP Loire Estuaire	Articles de journaux
2009	06/2009		Saint-Nazaire	Observation d'algues vertes			
2011	08/2011		Nantes	Arrêté d'interdiction de baignade	Prolifération de cyanobactéries		
	08/2011		Saint-Nazaire	Observation d'algues vertes			

DSP : « Diarrheic Shellfish Poisoning » : Toxine pouvant être émise par certaines espèces de phytoplancton rendant certains coquillages impropre à la consommation

2.2. Législation en vigueur

2.2.1. LEGISLATION ET NORMES EUROPEENNE

A l'échelle européenne, les moyens mis en place pour lutter contre l'eutrophisation sont nombreux (EAA, 2014). Après une prise de conscience écologique dans les années 1950-1970, plusieurs directives et politiques publiques ont été mises en place pour tenter de diminuer les rejets en nutriments et de contrôler l'eutrophisation à l'échelle européenne (Bouraoui & Grizzetti, 2011). Pour cela, des directives successives ont été mises en place avec des objectifs différents mais complémentaires, dont les principales sont brièvement décrites ci-dessous :

La Politique Agricole Commune, PAC – Mise en place en Europe en 1962, ses principes fondamentaux reposent sur l'accroissement de la production agricole. Si sa vocation première n'a aucune dimension de protection environnementale, les réformes successives de la PAC vont peu à peu inclure des notions de respect de l'environnement et de développement durable (réforme du 26 juin 2003) (CE, 2014).

La Directive Nitrates, 91/676/CE – Etablie le 12 décembre 1991, cette Directive relative la à protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir des sources agricoles a pour objectif principal de réduire les pollutions des eaux provoquées ou induites par les nitrates (utilisation comme fertilisants, ruissellement, effluents d'élevage, etc.) (JOCE, 1991a).

La Directives sur les eaux résiduaires urbaines, 91/271/EEC, DERU – Faisant suite à la directive nitrates, la DERU impose une obligation de collecte et de traitement des eaux usées sur le territoire européen. Au-delà de la mise en conformité des réseaux d'assainissement, ses objectifs sont également de protéger la sensibilité des milieux qui sont les accepteurs des rejets finaux (JOCE, 1991b).

La Directive cadre sur l'eau, 2000/60/CEE, DCE – Datant du 23 octobre 2000, la DCE fixe un cadre pour la gestion et la protection de la ressource en eau. L'objectif de la DCE est de préserver, d'améliorer et de favoriser la restauration de l'état des eaux superficielles (côtières et intérieures), souterraines et artificielles (canaux) (JOCE, 2000).

La Directive cadre stratégie pour le milieu marin, 2008/56/CEE, DCSMM – Dans la lignée de la DCE, la DCSMM a pour but de définir des objectifs environnementaux et des indicateurs pour parvenir à l'obtention d'un bon état écologique du milieu marin (JOCE, 2008).

2.2.2. APPLICATION DANS LE DROIT FRANÇAIS ET MESURES NATIONALES

L'ensemble de ces mesures européennes a été retranscrits dans le droit français (tableau 5) et fut complété au fil des années par un certain nombre de mesures nationales.

Tableau 5 : Transposition du droit européen dans le droit français (d'après legifrance.fr)

Directive Européenne	Transposition dans le droit français
Directive Nitrates 91/676/CE	Article R211-80 et R211-81 du code de l'environnement
DERU 91/271/CEE	Décret du 03/06/1994 de la loi sur l'eau n°92-3, relatif à la collecte et au traitement des eaux usées Arrêté du 22/06/2007 relatif à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées des agglomérations
DCE 2000/60/CEE	Modification du code de l'environnement selon la Loi n°2004-338 relatif à la transposition de la DCE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau
DCSMM 2008/56/CEE	Articles L219-9 à L219-18 et R219-2 à R219-17 du code de l'environnement

Historique des principales mesures d'amélioration de la qualité de l'eau - En France, la première mesure fait suite à l'avenant du 28 mai 1990 signé entre l'Association des Industriels des Savons et des Détergents (AISD) et le Ministère

chargé à l'environnement, limitant à un seuil maximal de 20% les teneurs en TPPS (TriPolyPhosphates de Sodium) autorisées dans les lessives (Glannaud, 2008). Deux ans plus tard, en 1992, c'est la **loi sur l'eau n° 92-3** qui met en avant les **impératifs de protection de la qualité de l'eau** essentiellement grâce à la mise en place de nouveaux outils de gestion des eaux : les Schémas (Directeur) d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE et SAGE) (JORF, 1992). En 1994, la transposition dans le droit français de la DERU par décret (tableau 5) permet de **limiter** peu à peu les **apports nutritifs** dans le milieu aquatique par **réduction** des limitations et centralisation des effluents d'épuration ainsi que par leur mise en conformité (JORF, 1994). Autrefois limités, les **rejets en phosphore** dans les milieux dits « sensibles » à l'eutrophisation sont strictement interdits en 1998 par arrêté du 27 février 1998 (JORF, 1998). La **loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA)** du 30 décembre 2006 permet d'actualiser le cadre global des précédentes lois sur l'eau par intégration des principes de la DCE et de l'adaptation au changement climatique de la ressource en eau (JORF, 2006). En 2007, les mesures prises pour la réduction des phosphates se poursuivent par **interdiction total** des phosphates dans les lessives textiles domestiques par décret (200-497) et qui s'étend à tous les produits lessiviels en 2008 (JORF, 2007 ; Glannaud, 2008) (figure 10).

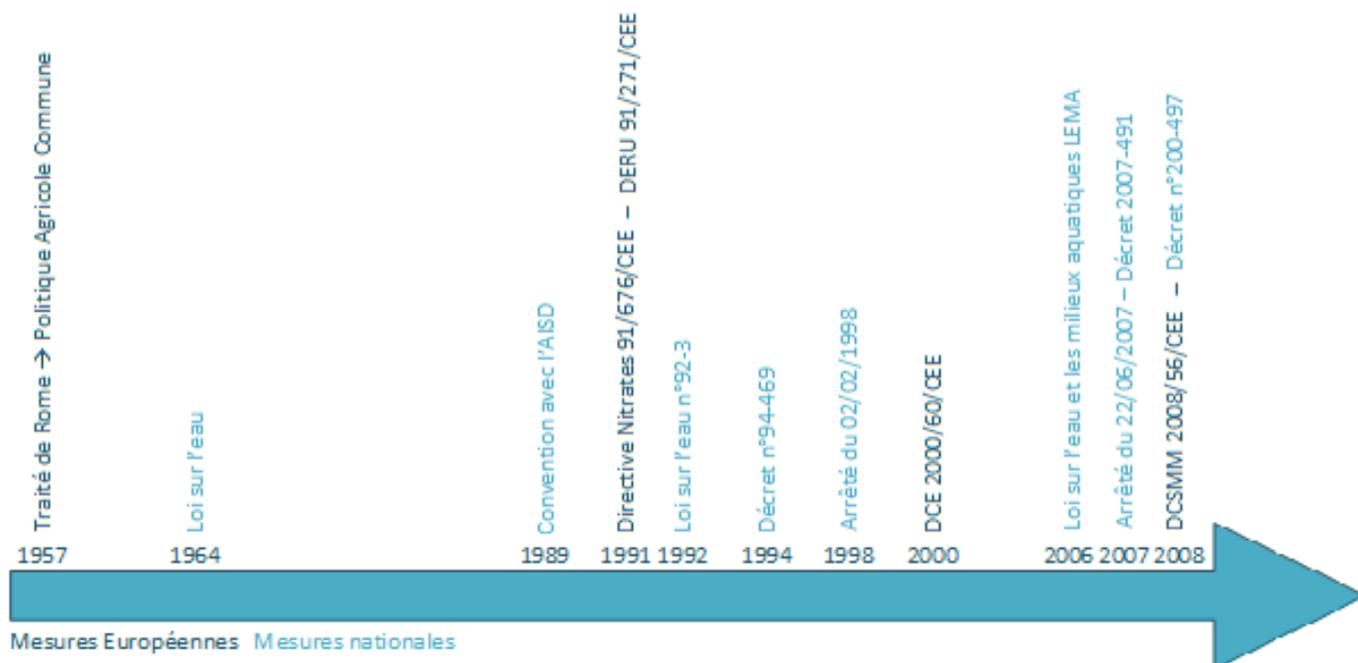


Figure 10 : Synthèse des mesures mises en place en Europe et en France pour l'amélioration de la qualité de l'eau et de sa gestion (d'après legifrance.fr)

Estimation de la qualité de l'eau en France – L'estimation de la qualité des masses d'eau repose sur les mesures imposées par la DCE en 2000 et est fonction de la typologie des masses d'eau. Etabli à l'échelle nationale cette typologie a pour but de « regrouper les milieux aquatiques homogènes » qui présentent des caractéristiques naturelles similaires (géomorphologie, climatologie, conditions hydrologiques...) qui seront structurantes dans la répartition de la faune et de la flore au sein du milieu (JORF, 2010). Cette typologie permet la classification de 4 types de masses d'eau de surface : les cours d'eau, les plans d'eau, les masses d'eau de transition et les masses côtières (JORF, 2010). L'évaluation de la qualité de l'eau d'une masse d'eau sera donc fonction de sa typologie et d'une classification en 5 classes d'états allant de très bon à mauvais (très bon, bon, moyen, médiocre, mauvais). Cette dernière repose sur une évaluation des états écologique et chimique des masses d'eau défini selon différents éléments de qualité imposée par la directive (JOCE, 2000 ; JORF, 2010) (tableau 6).

Tableau 6: Synthèse de l'évaluation des états écologiques et chimiques des masses d'eaux douces et de transition dans l'application française de la DCE (d'après JOCE, 2000 ; JORF, 2010)

	Élément de qualité	Eaux douces	Eaux de transition
Etat écologique	Elément de qualité biologique	Phytoplancton	Phytoplancton
		Macrophytes et microbenthos	Algues macroscopiques
		Faune invertébré benthique	Faune invertébré benthique
		Ichtyofaune	Ichtyofaune
	Elément de qualité hydrologique		Angiospermes
		Régime hydrologique	Régime hydrologique
		Condition morphologique	Condition morphologique
	Elément physico-chimique soutenant la biologie		
		Température, bilan oxygène (O ₂ dissous, taux de saturation, DBO ₅ et DCO), acidification de l'eau, bilan en nutriments (phosphates, phosphore total, nitrates, nitrites, ammonium)	Température, bilan oxygène (O ₂ dissous, taux de saturation, DBO ₅ et DCO), acidification de l'eau, bilan en nutriments (phosphates, phosphore total, nitrates, nitrites, ammonium)
		Polluants synthétiques spécifiques	Polluants synthétiques spécifiques
	Polluants synthétiques non spécifiques	Polluants synthétiques non spécifiques	
Etat chimique	Fonction de la NQE-CMA et de la NQE-MA des 41 substances ou groupes de substances définis par la directive 2013/39/UE relative aux substances prioritaire pour la politique dans le domaine de l'eau		

Le dernier bilan national de la qualité des masses d'eau en France date de 2009 et établit que sur 11 523 masses d'eau de surface (cours d'eau, plans d'eau, eaux de transition et eaux côtières) :

- 45% présentent un très bon ou bon état écologique
- 38% présentent un état écologique moyen
- 15% présentent un état écologique considéré comme médiocre ou mauvais

Ce bilan fait également état de la qualité chimique de ces 11 523 masses d'eau dont 45% présentent un bon état chimique pour 21% déclassés en mauvais état et 34% non déterminés (*eau.france.fr*).

2.4. Perspectives et tendances d'évolution de l'eutrophisation

Si aujourd'hui beaucoup de pays ont limité et ont tenté de réguler les sources d'émissions d'azote et de phosphore, les pays en développement tendent à observer des phénomènes d'eutrophisation plus fréquents de par une utilisation non restrictive et non réglementée de fertilisants (Carpenter, 2005).

A l'échelle européenne, l'évolution des concentrations des différents nutriments intervenant directement dans les phénomènes d'eutrophisation est assez positive. Les teneurs en nitrates dans les milieux aquatiques ont tendance à diminuer à l'échelle européenne dans les masses d'eaux continentales depuis 2005 (EAA, 2014). D'une manière générale, les rapporteurs européens estiment que, dans l'ensemble des cours d'eau européens, les taux de nitrates sur la période 1992-2012 ont diminué d'environ 0,03mg/L, représentant une diminution de 0,8% par an. Cette diminution s'observe également pour les ortho-phosphates dont les concentrations européennes moyennes dans les eaux intérieures sont estimées à 0,003 mg/L, représentant une diminution de 2,1% par an sur les 20 dernières années (1992-2012) (EAA, 2014). Cependant ces diminutions ne reflètent pas la tendance générale de la période 1970-2000 marquée par une augmentation de 30% des concentrations en azotes et en phosphores dissous inorganiques ainsi qu'une augmentation de 10% en azotes et en phosphores particuliers dans les cours d'eau européens (Seitzinger & al, 2010).

A l'échelle de la Loire, les scénarios de modélisation montrent qu'une diminution des apports de la Loire à l'estuaire pourrait avoir un impact sur la biomasse moyenne. A l'échelle des grands fleuves européens, 4 scénarios à l'horizon 2050, sont proposés par Seitzinger et son équipe en 2010 : « global orchestration », « order from strength », « technogarden » et « adapting mosaic ». Ces quatre modèles se caractérisent par deux approches différentes : une

réponse active⁴ au problème de l'excès de nutriments dans les cours d'eau et réponse proactive des problèmes par accentuation des efforts, chacun de ces 4 scénarios se distinguant les uns des autres par leurs mises en application. A l'horizon 2050, ce sont les approches proactives qui tendent à l'obtention d'une diminution des rejets en nutriments et qui observent une diminution des concentrations en nitrates sur la période 2000-2050 (DIN à 18,9 en 2000, 17,7 en 2030 et 19,5 en 2050) pour le modèle « *adapting mosaic* » ; ou une stabilisation des concentrations sur cette même période pour le modèle « *technogarden* » (DIN à 18,9 en 2000, 18,8 en 2030 et 19,1 en 2050). Ces perspectives ont pour intérêt de montrer que les approches réactives (c'est-à-dire une approche qui favorise une prise de décision rapide et qui fournit une solution immédiate mais non nécessairement durable) ne fonctionnent pas sur le long terme, avec constatation d'une augmentation progressive des taux de DIN, DIP et DSi sur toute la période d'étude (Seitzinger, 2010).

Les **projections** faites sur les **modèles hydro-climatiques** peuvent également fournir des informations sur les tendances d'évolution de l'eutrophisation en Europe. En lien avec le changement climatique, les prédictions suggèrent une **augmentation** des **températures** de l'eau et une **augmentation** de la **variabilité des débits** pour les prochaines décennies, selon une étude de Flourey en 2012 (Flourey & al, 2012). Ces projections reposent sur des constats faits au cours de ces 32 dernières années, avec des températures moyennes qui ont augmenté d'environ 1,2°C ; comme en atteste les observations faites en Loire par Moatar et Gailhard en 2006 avec des températures d'eau qui ont augmenté de 2,4 à 3°C en fonction des secteurs sur l'ensemble du linéaire de la Loire pour les périodes estivales entre 1976 et 2003 (Flourey & al, 2012 ; Moatar & Gailhard, 2006). Si ces projections restent à nuancer, elles témoignent de l'**influence du changement global** sur les **phénomènes d'eutrophisation** (Flourey & al, 2012).

2.5. Conclusion

Pendant près de 40 ans, les connaissances et les tentatives de gestion de l'eutrophisation ont évolué avec des priorités faites sur l'étude des nutriments et des populations phytoplanctoniques (Schindler, 2006). A l'échelle mondiale, l'eutrophisation est un problème récent avec une aire de répartition des nutriments qui correspond aux zones où les tendances démographiques et sociales sont fortes ; ces observations suggèrent que l'enrichissement en nutriments des espaces fluviomaritimes sera visible dans de nouveaux secteurs du monde actuellement en développement comme l'Asie, l'Afrique ou encore l'Amérique latine (Nixon, 1995). Les tentatives de régulation de l'eutrophisation à l'échelle mondiale devront donc prendre en compte ces nouveaux apports dans l'avenir même si les recherches actuellement menées sur ce sujet se focalisent plutôt vers de nouveaux paramètres comme l'augmentation de l'impact des activités humaines sur le climat, les changements d'occupation des sols ou encore l'étude des cycles intégrés des nutriments (Schindler, 2006).

La présente synthèse bibliographique, a permis de cadrer le sujet de stage en fournissant une définition de l'eutrophisation telle qu'elle est utilisée aujourd'hui par la communauté scientifique. Cette synthèse permet également d'avoir une première approche de l'ensemble des processus complexes qui régissent et caractérisent les phénomènes d'eutrophisation. La compilation des mesures prises pour l'amélioration de la qualité des eaux à l'échelle européenne et nationale fait état d'une nécessité de coordination entre les mesures politiques émises et leurs mises en application sur les territoires.

Sur la Loire, le constat est qu'il n'existe pas de réel inventaire de l'eutrophisation sur le long terme, avec quelques **vingtaines d'événements d'eutrophisation** recensés dans la littérature grise, sur le territoire s'étendant de la Maine à la mer. Dans le cadre du stage, ces événements pourront être confrontés aux données de surveillance afin d'observer ou non, l'existence de corrélation entre les deux et de mettre les événements recensés en parallèle avec les seuils d'eutrophisation existants. D'une manière générale, les événements inventoriés en Loire, de la Maine à la

⁴ Réponse active/pro-active : Une réponse active aux problèmes d'eutrophisation se traduit par la mise en place de nouvelles mesures politiques. Une réponse pro-active consistera en un simple renforcement ou une amélioration des mesures déjà existantes

mer, sont peu décrits et diffèrent dans leur description selon les auteurs et les études. Beaucoup d'événements recensés, comme le cas des mortalités animales et de crises d'hypoxies, ne sont que suspectés et doivent être confrontés aux données de surveillance des réseaux. Sur le territoire du GIP LE, la majorité des études ont été réalisées dans les années 1970-1980, datent auxquelles les recherches sur l'eutrophisation s'intensifient partout dans le monde. Sur le linéaire de la Loire, les publications récentes (période 2000-2010) sont plus axées sur des paramètres comme la température ou les populations d'espèces et moins sur les nutriments en eux-mêmes. A plus grande échelle, l'eutrophisation devenant peu à peu un problème mondial, certaines études s'orientent aujourd'hui vers l'observation des effets des mesures environnementales et de l'impact de l'eutrophisation sur le littoral.

PARTIE 3 – MISE A JOUR ET TRAITEMENT DES DONNEES

3.1. Données à dispositions

3.1.1. DELIMITATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude du présent rapport correspond au domaine d'étude du GIP Loire Estuaire, soit la zone géographique allant des Ponts-de-Cé à Saint-Nazaire. Représentant les derniers 147 km de la Loire (pour rappel le linéaire de la Loire est de 1012 km), le domaine d'étude du GIP Loire Estuaire intègre une grande variabilité de milieux caractéristiques : système fluvial strict, zone soumise à la marée dynamique, zone du bouchon vaseux etc.

De 1996 à 2014, 35 stations de surveillance de la qualité des eaux ou des sédiments réparties sur tout le territoire sont, ou ont été, suivies par différents organismes sur toute ou partie de cette période (figure 11).

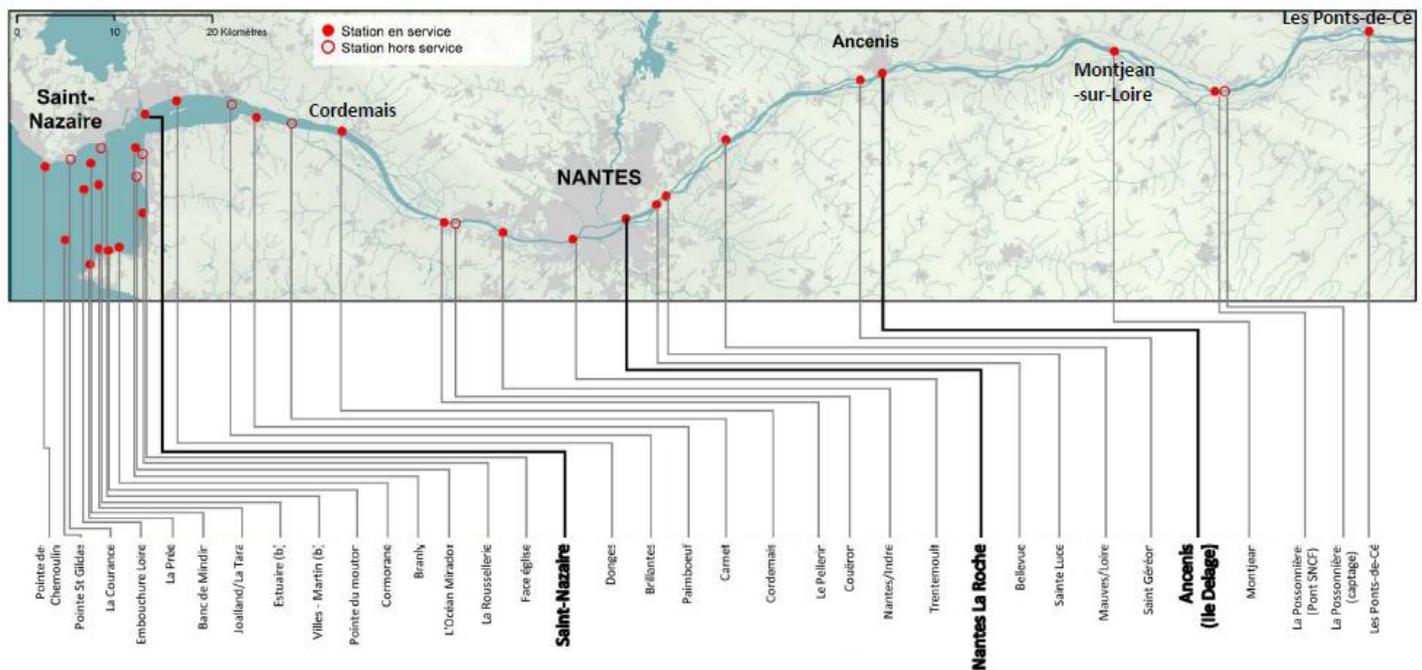
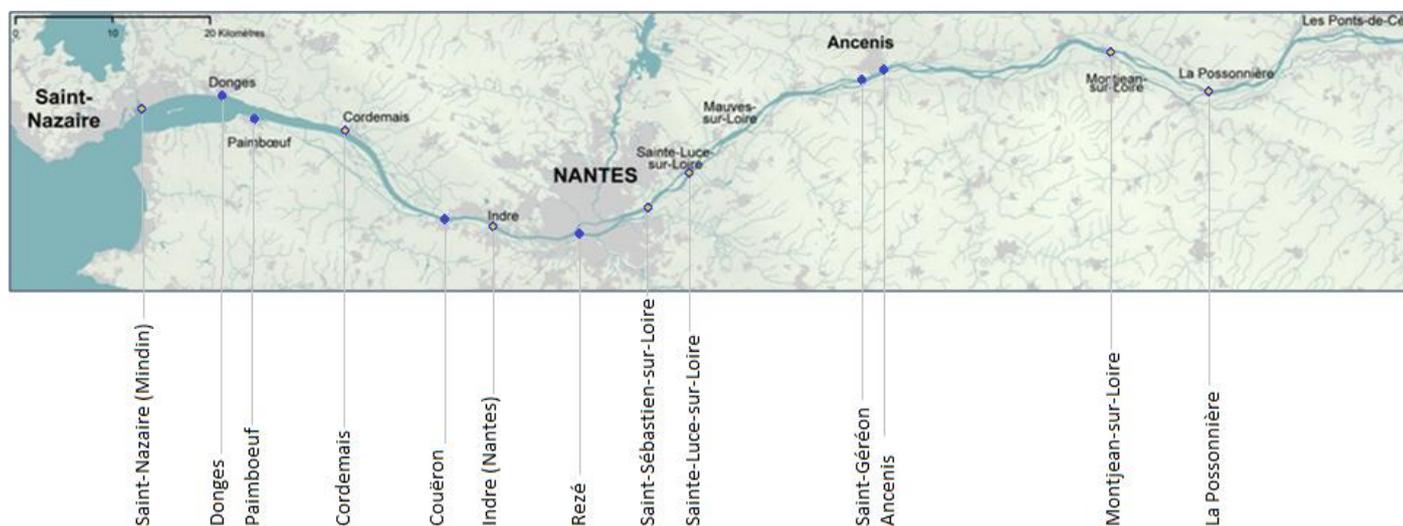


Figure 11: Synthèse des stations de suivis présentes sur le domaine d'étude du GIP Loire Estuaire (source : GIP Loire Estuaire)

13 stations ont été retenues pour l'élaboration de la base de données du GIP Loire Estuaire. Parmi ces 13 stations, 6 ont été sélectionnées et sont celles qui, globalement, présentent le plus de données sur la période 1970 - 2014 pour une grande diversité de paramètres (annexe 1). La réalisation de la mise à jour des fiches de suivi du GIP Loire Estuaire et l'analyse des données en Loire effectuées dans le cadre du programme DIETE (figure 12), reposent sur ces 6 stations, qui sont caractéristiques des domaines fluvi-estuariens suivants :

- La Possonnière (PO) : Station strictement fluviale ;
- Montjean-sur-Loire (MJ): Station strictement fluviale et historique dans la mesure du débit en Loire (1863) ;
- Sainte-Luce-sur-Loire (SL) et Nantes (NA): Stations du bief fluvi-maritime sous influence de la marée dynamique et représentative des apports fluviaux ;
- Cordemais (CO): Station représentative de l'estuaire interne ;
- Saint-Nazaire (SN) : Station à la limite de l'estuaire externe



- ◆ Stations dont les données ont été collectées et synthétisées
- ◆ Stations étudiées dans le cadre du stage (mise à jour + programme DIETE)

Figure 12 : Synthèse des stations étudiées dans le cadre du stage (source GIP Loire Estuaire)

3.1.2. RESEAUX DE MESURES ET PARAMETRES UTILISES

L'ensemble des données bancarisées ont été récupérées auprès de différents producteurs :

- Agence de l'Eau Loire-Bretagne, AELB (base de données OSUR) ;
- Ifremer, Institut français pour la recherche et l'exploitation de la mer (base de données Quadrige 2) ;
- Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Loire-Atlantique, DDTM44 ;
- Département de Loire-Atlantique, ex-Conseil Général 44, CG44 ;
- Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Pays de la Loire, DREAL ;
- Météo-France.

Ces acteurs bancarisent leurs données dans des bases qui leur sont propres et qui présentent des encodages différents. Afin de créer une nouvelle base de données rassemblant les paramètres d'intérêt du GIP LE, il convient de compiler les données récupérées en les harmonisant.

Les données de l'AELB, ont été récupérées par extraction informatique le 15/04/2015 via la plateforme OSUR. Mise en place par l'agence de l'eau, cette base de données en ligne donne accès aux informations recueillies par les différents réseaux de surveillance de la qualité des cours d'eau et des plans d'eau (réseau de contrôle et de surveillance, RCS ; réseau de contrôle opérationnel, RCO ; réseaux départementaux ; réseau complémentaire de l'agence de l'eau, RCA) (eau-loire-bretagne.fr).

De la même façon, les données d'Ifremer ont été récupérées par extraction informatique le 15/04/2015 via la plateforme Quadrige2 mise à disposition par Ifremer. Créée dans le but de bancariser les données de surveillance du littoral, Quadrige 2 synthétise les données d'une dizaine de réseaux de surveillance (réseau nationale d'observation, RNO ; réseau de contrôle microbiologique, REMI ; réseau de surveillance du phytoplancton et des toxines phytoplanctonique, REPHY ; réseaux régionaux et départementaux ; réseau de suivi : impact des grands aménagements, IGO ; réseau mollusques des rendements aquacoles, REMORA , réseau benthique, REBENT ; réseau de suivi lagunaire, RSL) (envlit.ifremer.fr).

Enfin, les données de la DREAL Pays de la Loire ont été extraites informatiquement de leur base de données en ligne HYDRO par le GIP Loire Estuaire. Ces dernières ont été mises à disposition pour l'établissement de la base de données.

Les données de la DDTM44, du département de la Loire Atlantique et de Météo-France ont été récupérées sur demande auprès des responsables des services concernés :

- Unité milieux marins et littoraux – Service Ressources Naturelles et Paysages de la DDTM44, (demande encore en cours au 18/08/2015)

- Service Environnement – Direction Ecologie et Environnement du Département Loire-Atlantique, ex-CG44, le 02/04/2015
- Délégation Loire-Atlantique de Météo-France, le 20/07/2015

Les paramètres mesurés par les différents réseaux de surveillance de la qualité des milieux aquatiques sont très nombreux et sont relatifs à tout ce qui a trait à la qualité de l'eau (paramètres physico-chimiques, nutriments, pesticides, bactéries, etc.). Dans le cadre de la présente étude, les paramètres choisis sont tous en lien plus ou moins direct avec la thématique de l'eutrophisation et sont présentés dans la partie « 3.2. Base de données du GIP Loire Estuaire et Mise à jour des indicateurs – 3.2.1. Création de la base de données – a. Définition des champs de la Base de données (BDD) et traçabilité des données » (annexe 2).

3.1.3. FREQUENCE ET PERIODE D'ACQUISITION DES DONNEES

Les données ont été récupérées sur la période 1970 - 2015, dans la mesure de leur existence et de leur accessibilité. En fonction des stations et des paramètres, cette période de 45 ans n'est parfois que partiellement couverte par les suivis (annexe 3). Concernant les fréquences d'acquisition des données, les résultats sont également très hétéroclites en fonction des stations, des paramètres, des années et des producteurs de données (tableau 7).

Tableau 7: Synthèse du nombre moyen de valeur par mois et de la fréquence d'acquisition des 6 stations étudiées dans le cadre du stage

	La Possonnière	Montjean	Sainte-Luce-sur-Loire	Nantes (Indre)	Cordemais	Saint-Nazaire (Mindin)
Nombre moyen de valeurs par mois	1,03	1,54	0,95	0,91	0,84	0,9
Période d'acquisition	1976-2012	1980 1993-2014	1971-2014	1971 1976-2014	1982-2014	1993-2014

3.2. Base de données du GIP Loire Estuaire et Mise à jour des fiches de suivi à long terme

La collecte de données et leur analyse dans le but de promouvoir et de partager les connaissances établies sur la Loire et son estuaire, constituent la vocation première du pôle « connaissance / diffusion ». C'est dans ce but de collecte que la base de données spécifique à la thématique de l'eutrophisation a été créée pour des données allant de 1970 à aujourd'hui. Celle-ci servira à fournir l'ensemble des données brutes nécessaires à la mise à jour des fiches de suivis concernées sur une période étendue à 40 ans (20 auparavant).

3.2.1. CREATION DE LA BASE DE DONNEES

Afin que le GIP Loire Estuaire puisse utiliser et gérer la base de données ainsi créée, l'objectif de cette partie est d'en présenter l'architecture.

a. Définition des champs de la base de données (BDD) et traçabilité des données

Le choix des champs de la BDD a été effectué en fonction du lien existant entre les paramètres et les phénomènes d'eutrophisation. Ont également été pris en compte, les niveaux de qualité de chacun de ces paramètres. Les principales variables retenues pour la définition de ces champs sont (tableau 8) :

Tableau 8 : Synthèse des variables utilisées pour la définition des champs de la base de données

NUTRIMENTS	nitrate, nitrite, ammonium, azote de Kjeldhal, phosphate, phosphore total, orthophosphate, silicate
PHYTOPLANCTON	chlorophylle <i>a</i> , phéopigments
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	matières en suspension, conductivité, O ₂ dissous, taux de saturation en O ₂ , DBO ₅ , DCO ₅
PARAMETRES ABIOTIQUE	débit, coefficient de marée, salinité, ensoleillement, pH, température
AUTRES	date et heure de prélèvement
<i>Représente les paramètres auxquels les niveaux de qualité de 1 à 10 sont attribués</i>	

Les niveaux de qualité OSUR définis dans le champ « *qual_* » ont pour but de préciser le niveau de certitude de la valeur du paramètre mesuré. Une qualité estimée à « 1 » signifie que les concentrations mesurées se situent dans la gamme de validité contrairement à une qualité de « 10 », qui indique que les concentrations mesurées sont inférieures aux seuils de quantification (eau-loire-bretagne.fr).

Il en est de même pour les codes fractions qui sont indiqués dans la BDD par un fond coloré qui donne une information sur l'échantillon de mesure. Un code de fraction « 23 » indique que la mesure a été réalisée dans une eau brute, c'est-à-dire dans une eau qui n'a subi aucun traitement ou manipulation. Un code de fraction à « 3 » signifie que les mesures du paramètre d'intérêt ont été réalisées en phase aqueuse, c'est-à-dire sur une eau qui a été préalablement filtrée.

Au total, la BDD compte 43 champs qui sont tous détaillés dans la notice explicative liée au fichier de données (annexe 4).

Enfin, chaque producteur est associé à une couleur lors de la bancarisation, selon les données brutes qui lui sont associées. En effet, cette traçabilité est indispensable lors des phases d'analyse. Les ruptures de courbes ou les décrochages visibles sur une chronique, peuvent s'expliquer par un changement de laboratoire ou de producteur, par une évolution des techniques d'analyse et des protocoles d'échantillonnage au cours du temps ou encore par des erreurs de bancarisation.

Représentation final en base de données : MAJ_Station_GIP

AELB – Phase aqueuse 3	DDTM 44
AELB – Eau brute 23	Quadrige
CG 44	DREAL
Données calculées	

b. Données modifiées

Les données récoltées ne présentent pas nécessairement une harmonie dans les unités de mesures ou dans les techniques de prélèvement. Ainsi, un diagnostic des données est effectué, et est suivi des modifications nécessaires (conversions, calcul etc.) avant leur intégration dans la base de données (annexe 4).

Dans le cas du paramètre « salinité », l'absence de données sur la quasi-totalité des stations sur la période 1970-2015 est palliée par le calcul de la salinité à partir des données existantes de conductivité et de température, selon la formule extraite de « *Hydrologie des écosystèmes marins ; paramètres et analyses* » de A.Aminot et R.Kérouel (2004).

La première étape du calcul de la salinité est de déterminer le rapport de conductivité *in situ* R. Celui-ci s'exprime par le rapport entre la conductivité mesurée *in situ*, et la conductivité standard $C_{S,t,p}$ pour une salinité $S = 35$, une température $t = 15^\circ\text{C}$ et une pression *in situ* $p = 0$ soit $C_{35,15,0}$.

$$R = \frac{C_{S,t,p} \text{ in situ}}{C_{35,15,0}} \text{ sachant que } C_{35,15,0} = 42,914 \text{ mS.cm}^{-1} \text{ selon Culkin \& Smith (1980)}$$

Sachant que $R = \frac{C_{S,t,p} \text{ in situ}}{C_{35,15,0}} = \frac{C_{S,t,p}}{C_{S,t,0}} \times \frac{C_{35,t,0}}{C_{35,15,0}} \times \frac{C_{S,t,0}}{C_{35,t,0}}$ on obtient $R = R_p \times r_t \times R_t$, il est donc possible de déterminer

$$R_t = \frac{R}{R_p \times r_t} \text{ représentant le rapport de conductivité corrigé nécessaire au calcul final de la salinité.}$$

Les coefficients R_p et r_t se calculent à partir des algorithmes spécifiques suivants :

$$R_p = 1 + \frac{[p(e_1 + e_2p + e_3p^2)]}{[1 + d_1t + d_2t^2 + (d_3 + d_4t)R]} \text{ avec } e_1 = 2,070.10^{-4}; e_2 = -6,370.10^{-8}; e_3 = 3,989.10^{-12}; d_1 = 3,426.10^{-2}; d_2 = 4,464.10^{-4}; d_3 = 4,215.10^{-1}; d_4 = -3,107.10^{-3}$$

$$r_t = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + c_4t^4 \text{ avec } c_0 = 0,6766097; c_1 = 2,00564.10^{-2}; c_2 = 1,104259.10^{-4}; c_3 = -6,9698.10^{-7}; c_4 = 1,0031.10^{-9}$$

Une fois R_t calculé, il est possible de déterminer la salinité par application de la relation de « l'échelle de salinité pratique » établie en 1978 :

$$S = a_0 + a_1.R_t^{0,5} + a_2.R_t + a_3.R_t^{1,5} + a_4.R_t^2 + a_5.R_t^{2,5} + \{(t - 15)/[1 + k(t-15)]\} X (b_0 + b_1.R_t^{0,5} + b_2.R_t + b_3.R_t^{1,5} + b_4.R_t^2 + b_5.R_t^{2,5})$$

où $a_0 = 0,0080$; $a_1 = -0,1692$; $a_2 = 25,3851$; $a_3 = 14,0941$; $a_4 = -7,0261$; $a_5 = 2,7081$ tel que $\sum a_i = 35,00$; $b_0 = 0,0005$; $b_1 = -0,0056$; $b_2 = -0,0066$; $b_3 = -0,0375$; $b_4 = 0,0636$; $b_5 = -0,0144$ tel que $\sum b_i = 0,00$; $k = 0,0162$

Représentation finale en base de données : MAJ_Station_GIP

L'ensemble des données de salinité déterminées à l'aide de ces calculs est indiqué par un fond blanc et une qualité de mesure non définie (-) dans la base de données et ce par opposition aux données de la DDTM44, par exemple, présentées sur un fond bleu ; auxquelles sont associées des codes qualité 1 ou 10

	A	B	Z	AA	AB	AC
1	Date de prélèvement	Débit	Salinité	Qual_S	pH	Qual_pH
9050	10/10/1994	744	0.2	-	8	1
9078	07/11/1994	1760	0.2	-	7.71	1
9107	06/12/1994	950	0.2	-	7.77	1
9164	01/02/1995	5130	0.1	-	7.81	1

c. Bancarisation et synthèse des données

La base de données finalisée comporte un jeu de 79 422 données réparties sur 13 stations allant de La Possonnière à Saint-Nazaire pour une gamme de 20 paramètres différents (annexe 2).

d. Pérennité de la base de données et clefs de lecture

La base de données et l'ensemble des fichiers de travail associés (données brutes extraites, feuilles de calculs de la salinité...) présentent, sans exception, un feuillet « notice » explicatif. Sur chaque feuillet, se trouvent les informations nécessaires à la bonne compréhension et à l'utilisation des données (annexe 5).

Ces notices présentent ainsi les informations de base suivantes :

- Titre
- Nom du fichier
- Source des données : précise le producteur des données et l'arborescence informatique pour accéder au fichier de données brutes
- Date de création et de mise à jour

A ces informations de base, la totalité des champs renseignés est définie dans cette notice explicative tout comme l'intérêt et la définition des titres de chaque feuillet.

Représentation finale en base de données : Ext_Def_salinité

A	B	C	D	E	F
1	Extraction des données de conductivité et température pour définition de la salinité				
2	GIP Loire Estuaire				
3	Nom du fichier : Ext_Def_Salinité				
4	Source des données : Base de données OSUR (AELB) + Extraction CG44 + Extraction DDTM44 + Base de données Quadrige (Ifremer)				
5	Extraction OSUR - Agence de l'Eau Loire Bretagne (15/04/2015) P:\Henry_Sybill\1_Données_2015\1_Producteurs\AELB_20150415				
6	Extraction Conseil Général 44 (02/04/2015) P:\Henry_Sybill\1_Données_2015\1_Producteurs\CG44_C.Dumottay				
7	Extraction Direction Départementale des Territoires et de la Mer (05/05/2015) P:\Henry_Sybill\1_Données_2015\1_Producteurs\DDTM44				
8	Extraction Quadrige - Ifremer (15/04/2015) P:\Henry_Sybill\1_Données_2015\1_Producteurs\Ifremer\Quadrige_20150415				
9	Glossaire de la banque de données OSUR_WEB2 (téléchargé le 28/05/2015) P:\Henry_Sybill\5_Documents				
10	Formules selon : Aminot A., Kérouel R., (2004), <i>Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses</i> . Ed. Ifremer. p336				
11					
12					
13					
14					
15	Feuillet 2 et autres "Sainte-Luce-sur-Loire": Présentation des données existantes (1970 - 2015) pour différents paramètres				
16	Date de prélèvement #				
17	Salinité Salinité				
18	Température de l'eau Température de l'eau en °C				
19	Conductivité Conductivité en µS/cm				
20	Qual_exemple Code d'analyse justifiant des résultats d'analyse inférieurs/supérieurs aux valeurs seuils ²				
21	Rapport de conductivité Rapport de conductivité in situ selon $R_t = R / (R_p \cdot t) = CS_t \cdot p / (42,914 \cdot r_t)$				
22	Salinité_5 Salinité établis en fonction de la conductivité et de la température selon la formule				
23	$S = a_0 + a_1.R_t^{0,5} + a_2.R_t + a_3.R_t^{1,5} + a_4.R_t^2 + a_5.R_t^{2,5} + \{(t - 15)/[1 + k(t-15)]\} X (b_0 + b_1.R_t^{0,5} + b_2.R_t + b_3.R_t^{1,5} + b_4.R_t^2 + b_5.R_t^{2,5})$				
24					
25	1 : Libellé explicite ne nécessitant pas de justification				
26	2 : Code 1 : Concentrations mesurées se situant dans la gamme de validité, celles-ci sont supérieures aux seuils de quantification ou inférieures aux seuils de saturation ; Code 10 : Concentrations mesurées inférieures aux seuils de quantification				
27					
28	NB : Les données DDTM44 et CG44 sont identiques sur la période 2007-2014 pour les stations de Sainte-Luce-sur-Loire, Cordemais et Saint-Nazaire - Mindin				
29	Les données DDTM44 et celles en provenance de la base de données OSUR sont parfois identiques sur la période 1996-2002 (Monjean) ; 1994-2003 (Sainte-Luce-sur-Loire) ; 1993-2003 (Nantes - Indre) ; 1993-2003 (Cordemais) ; 1994 - 2006 (Saint-Nazaire - Mindin)				
30					
31					
32	Création : 22/06/2015				
33	Mise à jour : 02/07/2015				

3.2.2. MISE A JOUR DES FICHES DE SYNTHÈSE

Les fiches de suivis du GIP Loire Estuaire, aussi appelées fiches « indicateur », reposent sur un double travail d'inventaire et d'analyse permettant de comprendre le fonctionnement global de la Loire et de son estuaire. Au nombre de 40, dont la majeure partie est publiée, un indicateur est un groupement d'une ou plusieurs données variables dans le temps et dans l'espace. Ces indicateurs permettent d'avoir une vision simple et synthétique d'un état ou d'une évolution d'un phénomène observé. Offrant une vision pluridisciplinaire de la Loire, allant des Pont-de-Cé à Saint-Nazaire, ces fiches s'articulent en plusieurs volets (de 2 à 4 volets) selon les indicateurs, et suivent toutes une même organisation :

- un volet « résumé » qui présente les principales conclusions de la fiche ;
- un volet « objectif / définition » auquel peut être associé les précautions prises et les choix méthodologiques faits lors de l'élaboration du suivi à long terme ;
- un volet « interprétation » où sont présentés les résultats de façon illustrée (tableaux, graphiques, etc.) ;
- un volet « source et méthodologie » détaillant certains calculs et présentant les limites des indicateurs ;
- un volet « informations complémentaires » qui n'est pas systématique, mais qui peut fournir un éclairage historique ou géographique
- un volet « références » mettant en avant les ouvrages de références

Toutes ces fiches sont donc construites à l'identique et sont régulièrement mises à jour par le GIP Loire Estuaire, grâce à une collecte régulière de données. Elles ont pour objectifs de faire une analyse des séries temporelles dans le but de décrire et/ou d'observer un phénomène au cours du temps et d'en comprendre l'évolution sur un pas de temps choisi.

Dans le cadre du stage, c'est une mise à jour simplifiée de deux fiches indicateurs du GIP LE, « les nutriments » et « vitalité du phytoplancton végétal » qui est proposée. Cette mise à jour consiste en une reprise des graphiques déjà édités par le GIP LE en élargissant la période d'étude, passant d'une prospective sur la période 1984 - 2012 à la période étendue sur 40 ans 1971 - 2014. L'ensemble des stations étudiées dans le cadre du stage sont actualisées : La Possonnière (PO), Montjean-sur-Loire (MJ), Sainte-Luce-sur-Loire (SL), Nantes/Indre (NA), Cordemais (CO) et Saint-Nazaire/Mindin (SN). La mise à jour est associée à tout un ensemble de graphiques dits « de propositions » dans lesquels sont présentés d'autres analyses possible des données.

a. La mise à jour de la fiche « nutriments » L2 A2¹

Editée pour la dernière fois en 2013, la fiche « les nutriments » présente le suivi de l'évolution des apports en nitrates et en phosphore total (dissous et particulaire) sur le territoire d'étude du GIP LE allant de la Maine à la mer. Les principales conclusions de cette fiche sont les suivantes sur la période 1996 - 2012 :

« Les quantités de nitrates apportés à l'estuaire sont corrélées au débit du fleuve [...] sans dégager de tendance d'évolution depuis 1984 »
« Nette diminution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total [...] constatée »
« Phosphore fixé dans la masse turbide de l'estuaire »
« Flux annuels estimés entre 200 000 et 600 000 t/an de nitrates et entre 1400 et 8000 t/an en phosphore total »

Est présentée ici, la mise à jour des analyses conduites à Saint-Luce-sur-Loire (SL) par le GIP LE en 2013, cette dernière présentant la chronique la plus longue (annexe 1) ; les résultats des autres stations étudiées seront également discutés. Afin d'être représentatives des apports fluviaux stricts, les valeurs présentées ici sont toutes issues des prélèvements faits à basse mer.

¹ Fiche « les nutriments » L2 A2 pour clef de Lecture n°2 « la Dynamique de la vie », thème A « L'eau support de vie » fiche 2 ; Fiche « vitalité du phytoplancton végétal » L2 A4 pour clef de Lecture n°2, fiche 4

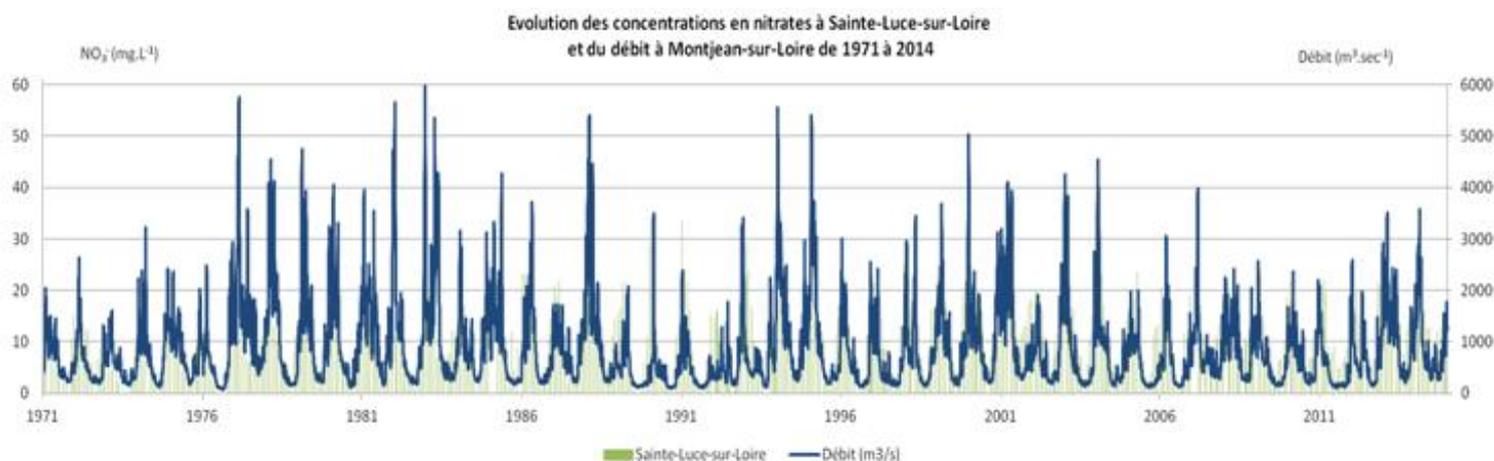


Figure 1 : Graphique de l'évolution des concentrations en nitrates à Sainte-Luce-sur-Loire et du débit à Montjean-sur-Loire de 1971 à 2014 (sources : AELB, Département 44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)

Concernant les nitrates, les conclusions diffèrent peu de celles de la fiche de 2013. L'extension de la période d'étude confirme le fait que, globalement, les concentrations en nitrates sont corrélées au débit du fleuve. Les concentrations en nitrates observées sont généralement moindres en période d'étiage ($< 300 \text{ m}^3/\text{s}$) que pendant les périodes de débits plus soutenus ($> 2000 \text{ m}^3/\text{s}$). Les pics de concentration s'observent majoritairement suite aux épisodes de fortes crues. Ces pics peuvent se justifier par le fait que les premières fortes crues d'hiver qui vont succéder une longue période d'étiage, vont engendrer un lessivage des sols important et drainer jusqu'au milieu aquatique des nitrates, en particulier en Loire dont le bassin est à dominance agricole. La concentration maximale sur la chronique est atteinte le 9 janvier 1991 pour une valeur de $33,7 \text{ mg/L}$. Avec un débit journalier estimé à $2030 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station de Montjean-sur-Loire (MJ) le 9 janvier 1991, cette première crue d'hiver fait suite à l'étiage long et prolongé de l'année 1990 ($437 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne sur l'année).

Toutes stations confondues, la concentration maximale en nitrates mesurée sur les 43 dernières années est de $50,9 \text{ mg/L}$ à la même date (09/01/1991) à La Possonnière (PO). A période comparable (période de 1993 à 2007 où les données en nitrates existent pour les 6 stations), la moyenne annuelle des concentrations en nitrates sur 14 ans varie peu le long du continuum fluvio-estuarien à l'exception des deux stations extrêmes, La Possonnière et Saint-Nazaire/Mindin (PO $15,2 \text{ mg/L}$; MJ $12,03 \text{ mg/L}$; SL $12,25 \text{ mg/L}$; NA $12,9 \text{ mg/L}$; CO $12,13 \text{ mg/L}$; SN $9,66 \text{ mg/L}$). La diminution de la moyenne annuelle à SN pouvant se justifier par le phénomène de dilution des eaux douces par les eaux marines qui s'observe dans l'estuaire.

Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014

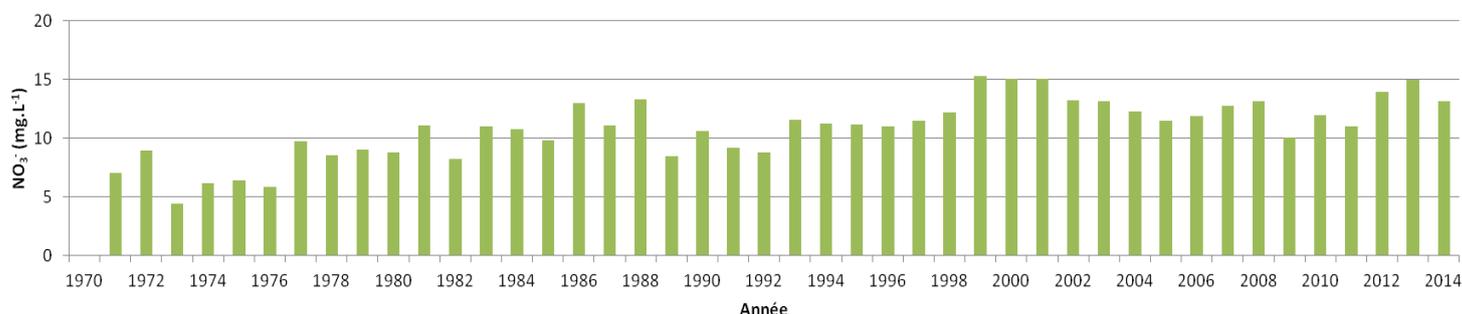


Figure 2 : Graphique de l'évolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014 (sources : AELB, Département 44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

Il est encore difficile de dégager une tendance d'évolution significative des nitrates sur la période étendue de 1971 à 2014. Cependant, sur la période 1971 – 1992, les deux tiers des moyennes annuelles des concentrations (15/21 années) sont inférieures à 10 mg/L , alors que postérieurement (de 1993 à 2014), ces moyennes annuelles varient toutes entre 10 et 15 mg/L . La variation de moyenne annuelle des concentrations en nitrates peut être mise en relation avec l'intensification de l'agriculture sur tout le bassin versant de la Loire depuis plusieurs décennies. En plus

de ces apports locaux, la zone d'étude allant de PO à SN se situe à l'exutoire du fleuve Loire, long de 1012 km et qui, pour rappel, draine un bassin versant de 118 000 km² à dominance agricole et dont les apports au milieu aquatique sont difficilement quantifiables.

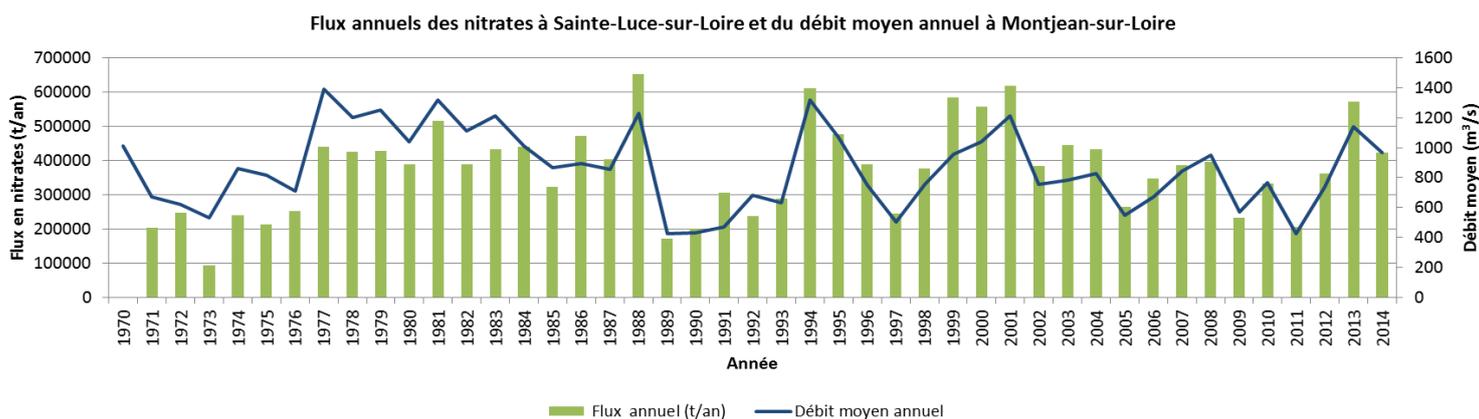


Figure 3 : Graphique de l'évolution des flux de nitrates à Sainte-Luce-sur-Loire et du débit moyen annuel en m³/s à Montjean-sur-Loire de 1971 à 2014, Flux $F = C \times Q$ avec $C = \sum(Q_j \times C_j) / \sum Q_j$ (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)

En plus de l'extension de la période d'étude, les débits moyens annuels ont été ajoutés dans cette mise à jour, afin de souligner le lien entre les flux et l'hydraulicité du fleuve. Concernant les flux annuels de nitrates, et en dehors de la période 1971- 1980 qui correspond à des concentrations annuelles faibles au regard de la chronique, les flux annuels les plus bas correspondent aux années les plus sèches. Les flux annuels les plus importants correspondant, eux, aux années les plus humides :

Tableau 1: Tableau de synthèse des flux annuels des années exceptionnelles (sèches et humides)

	Année	Flux en nitrates (t/an)	Débit moyen annuel (m ³ /s)	Volume d'eau apporté (m ³ /an)
Années sèches	1989	171 484	423	13 357 624 235
	1990	205 711	437	13 810 917 500
	2011	205 948	424	13 390 782 854
Années humides	1988	655 037	1235	39 068 067 805
	1994	615 524	1330	41 943 672 033
	2001	618 004	1212	38 250 308 283
	2013	572 578	1137	35 884 669 880

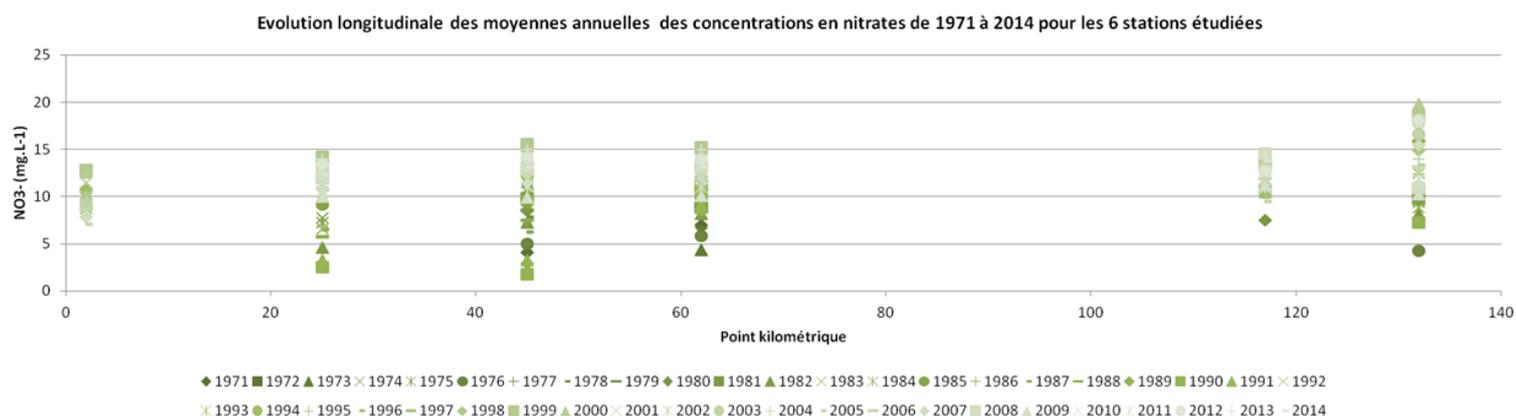


Figure 4: Synthèse de l'évolution longitudinale des moyennes annuelles des concentrations en nitrates de 1971 à 2014 pour les 6 stations étudiées, Points kilométriques : SN (2), CO (25), NA (45), SL (62), MJ (117), PO (132), (sources : AELB, Département 44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

A l'échelle inter-annuelle, les stations où il est donné d'observer les plus grandes variations de concentrations en nitrates sont PO, SL, NA et CO. La station PO, distante de 8 km du débouché de la Maine, est soumise aux apports de cet affluent de la Loire, dont les flux de nitrates peuvent varier de 30 000 à 200 000 t/an (variation observées sur la période 1996 – 2012). La baisse d'amplitude observée entre NA et SN peut s'expliquer par le phénomène de dilution évoqué précédemment, et qui s'observe sur tout le secteur en aval de Nantes. Pour les stations SL, NA, CO ces apports peuvent être d'origine locale, en provenance du bassin versant et de toute la vallée maraîchère qui s'étend d'Oudon à Sainte-Luce-sur-Loire. La baisse d'amplitude visible à MJ peut être soumise à l'hypothèse d'une consommation des ressources nutritives par le phytoplancton entre PO et MJ. Le minimum des moyennes annuelles

des concentrations en nitrates à 1,76mg/L s'observe à Cordemais pour l'année 1990 de faible hydraulicité (437m³/s de moyenne annuelle), alors que le maximum s'observe en 2000 à La Possonnière pour une concentration annuelle de 19,76mg/L et une hydraulicité forte (moyenne annuelle de 1076m³/s).

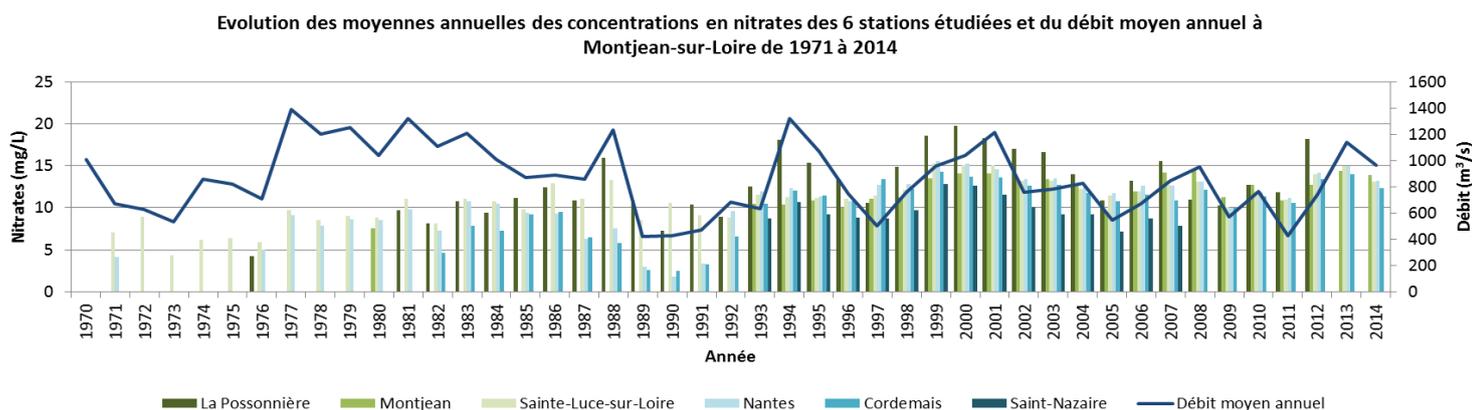


Figure 5 : Synthèse des moyennes annuelles des concentrations en nitrates des 6 stations étudiées et du débit moyen annuel à Montjean-sur-Loire de 1971 à 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)

Ici, les moyennes annuelles des concentrations en nitrates de toutes les stations ont été confrontées au débit moyen annuel. Les stations situées à l'amont de Nantes (PO, MJ, SL) sont essentiellement représentative du débit du fleuve. Les prélèvements étant réalisés à basse mer, il en de même pour les stations situées en aval de Nantes (NA, CO et SN). Si les données ne sont pas homogènes sur la durée de la chronique, l'allure générale de la courbe de débit semble corroborer les précédentes conclusions par lesquelles les teneurs en nitrates étaient contrôlées par le débit du fleuve. Les fortes précipitations qui sont à l'origine de l'augmentation du débit vont également générer le drainage du bassin versant et se traduisent par des apports de nitrates dans le milieu aquatique. Les pics de concentrations annuelles en nitrates s'observent pour la station PO, qui comme expliqué précédemment, est soumise aux apports de la Maine. Si les débits augmentent en Loire associés à une augmentation des apports de nitrates, il en sera de même pour la Maine située dans la même aire géographique. La station PO étant située à quelques kilomètres (8 km) de la confluence entre la Loire et la Maine, les pics de concentrations en nitrates observés peuvent s'expliquer par une accumulation des apports en nitrates à cet endroit : ceux de la Maine et ceux de la Loire amont.

Evolution du phosphore total entre 1971 et 2014 -

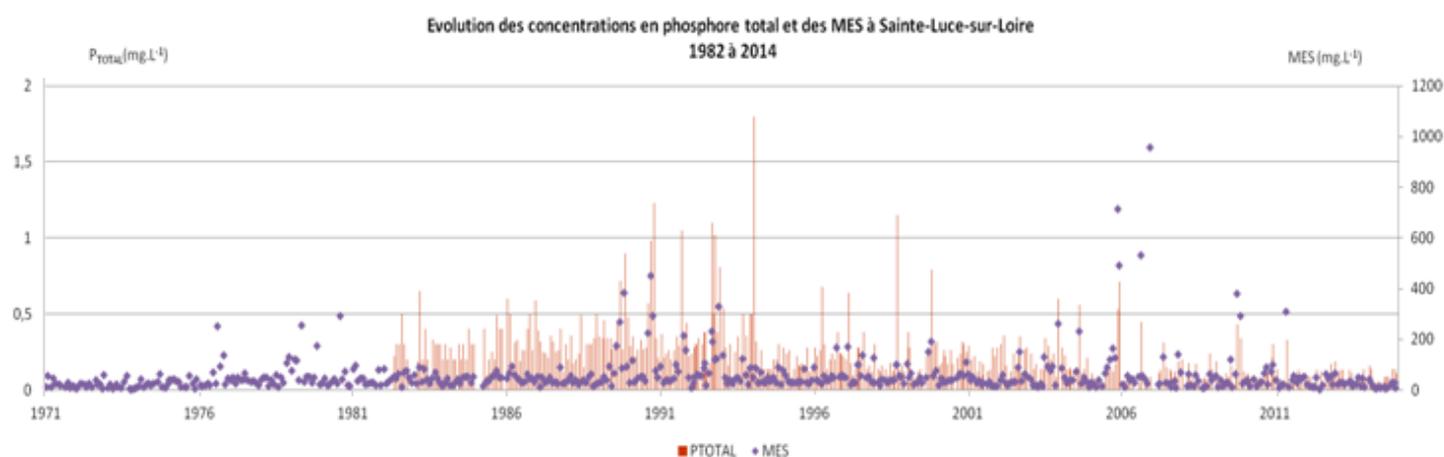


Figure 6 : Graphique de l'évolution des concentrations en phosphore total et des MES à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014, (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

Le phosphore total est, de par sa forme particulière, majoritairement lié aux matières en suspension (MES) avec des concentrations élevées de phosphore total souvent liées à de fortes concentrations de MES. Par exemple, le pic de phosphore total de 0,71mg/L relevé le 05/12/2005 est associé à des teneurs en MES mesurées à 492 mg/L. Au cours de ces 30 dernières années, les concentrations en phosphore total ont diminué comme en atteste la moindre

amplitude observée entre 2006 et 2014 (de 0,02 à 0,4 mg/L) par rapport à celle du début de la période d'étude (de 0,01 à 0,6 mg/L) pour des MES globalement restées stables.

L'analyse des résultats des autres stations met en avant le fait que dans le secteur situé à l'aval de Sainte-Luce-sur-Loire, les teneurs en MES sont plus élevées car il s'agit du secteur sous influence du bouchon vaseux. Les deux stations situées en amont (PO et MJ) ne sont pas sous cette influence avec des concentrations en MES qui sont donc moindres au regard des stations situées en aval : le maximum de MES relevé en amont est de 408 mg/L à La Possonnière alors le maximum en aval est mesuré à Cordemais pour une valeur de 5000 mg/L (période 1981 - 2014). Contrairement aux nitrates, les concentrations en phosphore total sont donc différentes en fonction de la présence ou non du bouchon vaseux :

- 0,2 mg/L de phosphore total en moyenne pour les stations amont (PO, MJ)
- 0,71 mg/L de phosphore total en moyenne pour les stations aval (NA, CO, SN)

Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total à Sainte-Luce-sur-Loire de 1982 à 2014

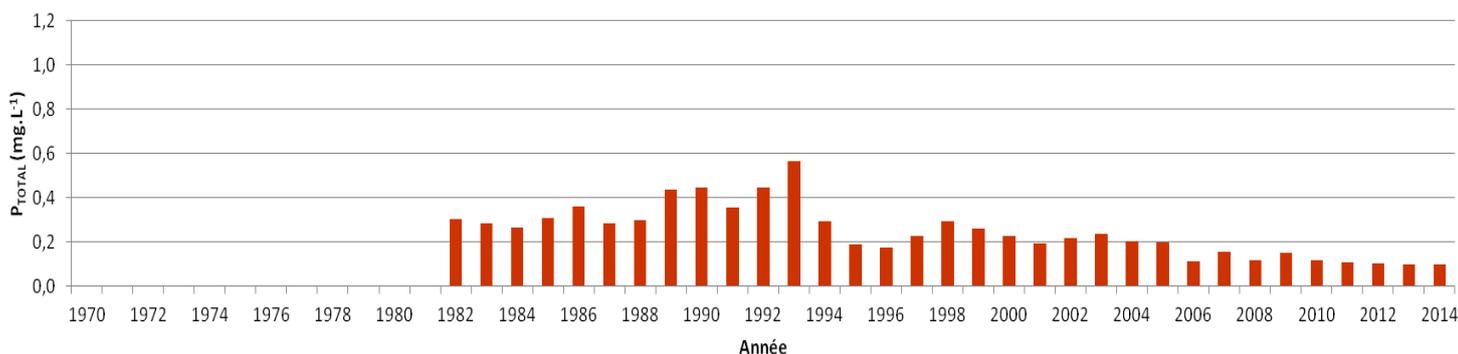


Figure 7 : Graphique de l'évolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total à Sainte-Luce-sur-Loire de 1982 à 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

Les moyennes annuelles des concentrations en phosphore total sur la période 2006 – 2014 sont deux à trois fois inférieures à celle du début de la période d'étude (1982- 1994). Après un pic en 1993, la diminution de ces moyennes s'explique probablement par la mise en application de la réglementation européenne et nationale. En 1989, la convention de l'AISD permet une limitation des rejets en Tripolyphosphate (TPP) limitant ainsi les apports d'éléments phosphorés dans le milieu aquatique. La transposition dans le droit français de la Directive relative aux eaux urbaines et usées (DERU) en 1994 visant principalement à l'amélioration des capacités épuratoire des stations d'épurations, explique probablement la diminution des moyennes annuelles des concentrations en phosphore total. L'application de mesures de plus en plus restrictives ces dernières décennies (1998, interdiction de rejets phosphatés dans les milieux sensibles ; 2007, réduction des phosphates dans l'ensemble des produits lessiviels) ont également pu contribuer à l'accroissement de la diminution visible entre 2006 et 2014.

Flux annuels en phosphore total à Sainte-Luce-sur-Loire et du débit moyen annuel à Montjean-sur-Loire

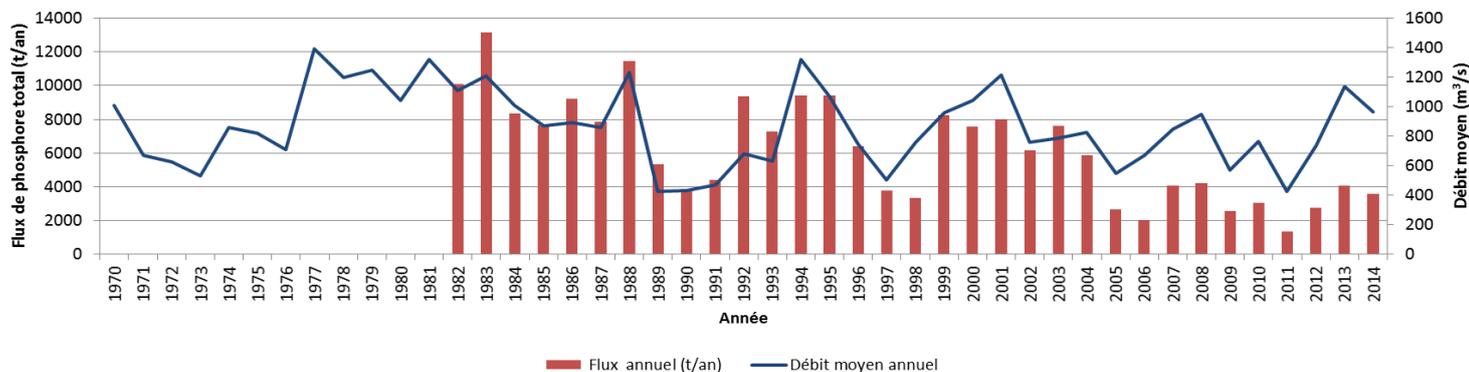


Figure 8 : Graphique de l'évolution des flux annuels de phosphore total à Sainte-Luce-sur-Loire et du débit moyen annuel à Montjean-sur-Loire de 1982 à 2014, Flux $F = C \times Q$ avec $C = \frac{\sum(Q_j \times C_j)}{\sum Q_j}$ (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)

La tendance à la diminution des concentrations en phosphore total, s'observe également pour les flux. Le « décrochage » des années 2005 – 2014 s'explique par le fait que les concentrations en phosphore total ont diminué au point que cela se répercute et s'observe sur les flux ; comme en atteste les flux observés pour les années exceptionnelles sur cette chronique de 10 ans. En effet, les flux annuels minimums correspondent aux années sèches, quand les flux maximums correspondent aux années humides (2011 et 2013 avec 1368 contre 4041 t/an de phosphore total pour des débits moyens respectif de 424 et 1137 m³/s).

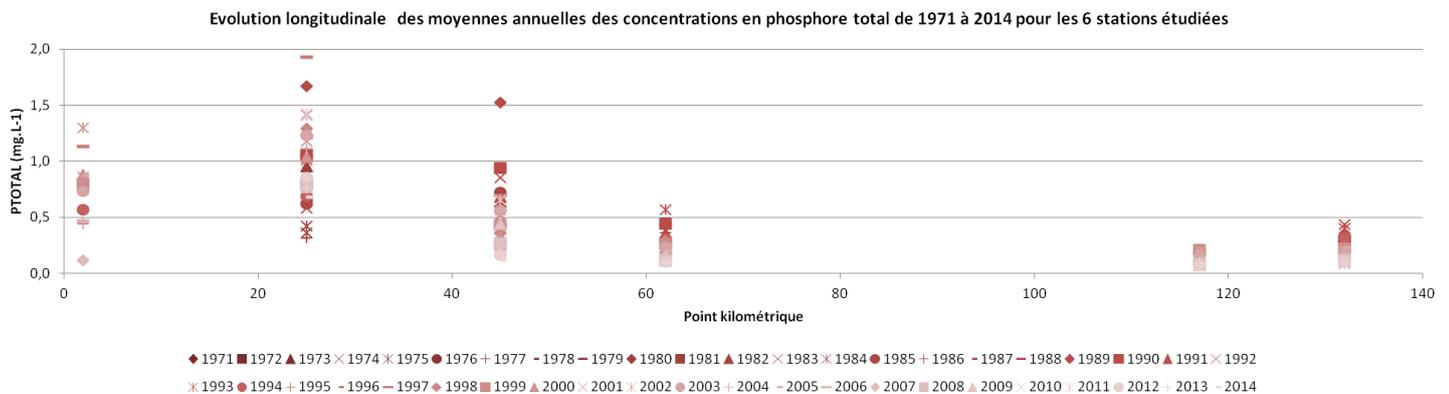


Figure 9 : Synthèse de l'évolution longitudinale des moyennes annuelles des concentrations en phosphore total de 1982 à 2014 pour les 6 stations étudiées, Points kilométriques : SN (2), CO (25), NA (45), SL (62), MJ (117), PO (132), (sources : AELB, Département 44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

A l'échelle inter-annuelle, les fortes variations de concentrations en phosphore total s'observent pour les 3 stations les plus aval et s'expliquent par la présence de la masse turbide dans ce secteur pour les raisons évoquées précédemment. L'augmentation des concentrations en phosphore total visible entre SL et NA (zone maximale de remontée du bouchon vaseux lors des périodes d'étiages en vives eaux) pourrait s'expliquer par la présence temporaire du bouchon vaseux ainsi que par la présence entre les deux, de deux affluents de la Loire qui vont contribuer aux variations de phosphore total, la Sèvre Nantaise (environ 400 t/an d'apport de phosphore total en 2006) et l'Erdre (moins de 100 t/an en 2006). A cela peut aussi s'ajouter les apports des deux grandes stations d'épuration de l'agglomération nantaise (STEP Rezé et Saint-Herblain), sources ponctuelles d'éléments phosphorés dans les milieux aquatiques. Le minimum de concentration sur toute la chronique est de 0,06 mg/L à MJ en 2011 quand le maximum est atteint à Cordemais pour une concentration de 1,97 à CO en 1997.

b. La mise à jour de la fiche « vitalité de phytoplancton végétal » L2 A4

La dernière version de la fiche indicateur « vitalité du phytoplancton végétal » remonte à 2005 et présente le suivi de l'évolution des concentrations en phytoplancton entre 1996 et 2002 des Ponts-de-Cé à Saint-Nazaire et dont les principales conclusions sont :

« Dans les eaux douce [...] la biomasse du plancton est abondante [...] et la vitalité de la population forte ; dans les eaux marines de l'estuaire externe, la production est peu abondante et la vitalité de la population moyenne ; [...] au niveau de la zone [turbide] l'abondance est tributaire des apports de l'amont et en moindre proportion des apports marins »

« Entre 1996 et 2002, les concentrations en phytoplancton ont baissé sensiblement à l'amont [et] peu dans l'estuaire externe signe d'apports marins »

« Interaction [entre] de nombreux paramètres qui n'autorisent pas à affirmer que cette tendance se poursuiv[e] dans les années à venir »

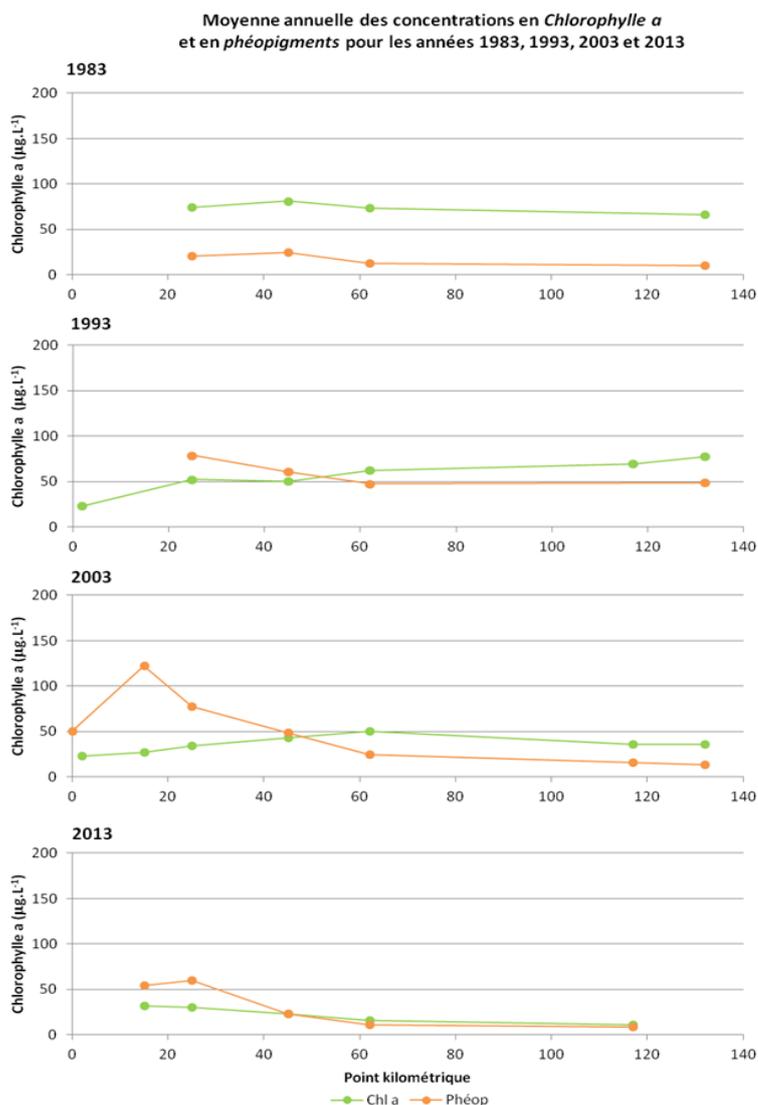


Figure 22 : Synthèse des moyennes annuelles de concentrations en chlorophylle a et en phéopigments pour les années 1983, 1993, 2003 et 2013 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

La vitalité du phytoplancton se traduit par le rapport entre le phytoplancton vivant exprimé par la chlorophylle a et le phytoplancton mort exprimé par les phéopigments :

$$\text{Vitalité du phytoplancton} = \frac{\text{Chlorophylle a [chl a]}}{\text{Phéopigments [phéo]}}$$

Les résultats présentés ici montrent l'évolution des moyennes annuelles des concentrations en chlorophylle a et en phéopigments par décennie de 1983 à 2013. D'une manière générale, les teneurs en chlorophylle a sont plus élevées en eaux douces et ce, jusqu'au point d'inversion à la station NA où les teneurs en phéopigments dominent. Entre NA et SN les eaux sont dites « mélangées » et représentent la zone de mélange entre les eaux douces et salées. La diminution de la chlorophylle a au profit des phéopigments dans cette zone est majoritairement due aux conditions hydro-sédimentaires de l'estuaire, qui limitent le maintien des populations phytoplanctoniques du fait de conditions de turbidité élevées (limitation de la photosynthèse). Au contact des eaux salées, les populations phytoplanctoniques d'eaux douces meurent, à l'instar des espèces marines ne supportant pas la dessalure, et contribuent ainsi à l'augmentation des phéopigments dans la zone estuarienne. Au regard des moyennes annuelles des concentrations observées, la tendance sur la période 1983 – 2013 est à la diminution. Les moyennes annuelles des

concentrations en eaux douces sont supérieures à 50 µg/L sur les décennies 1983 -1993, avant de devenir inférieures à 50 µg/L en 2003 et de chuter sous les 25 µg/L en 2013. Il en est de même pour les phéopigments, qui ont diminué au cours des 40 dernières années parallèlement à la chlorophylle a. Plusieurs hypothèses peuvent tenter d'expliquer ces diminutions :

- l'augmentation de la pression de prédation du fait d'un changement des communautés planctoniques hétérotrophes ou d'une introduction dans le milieu d'espèces invasives consommatrices de phytoplancton ;
- une modification des concentrations dans le milieu de certains facteurs essentiels au développement du phytoplancton, comme le carbone, la silice ou les oligo-éléments (fer, cuivre etc).

Répartition de la chlorophylle a et des phéopigments –

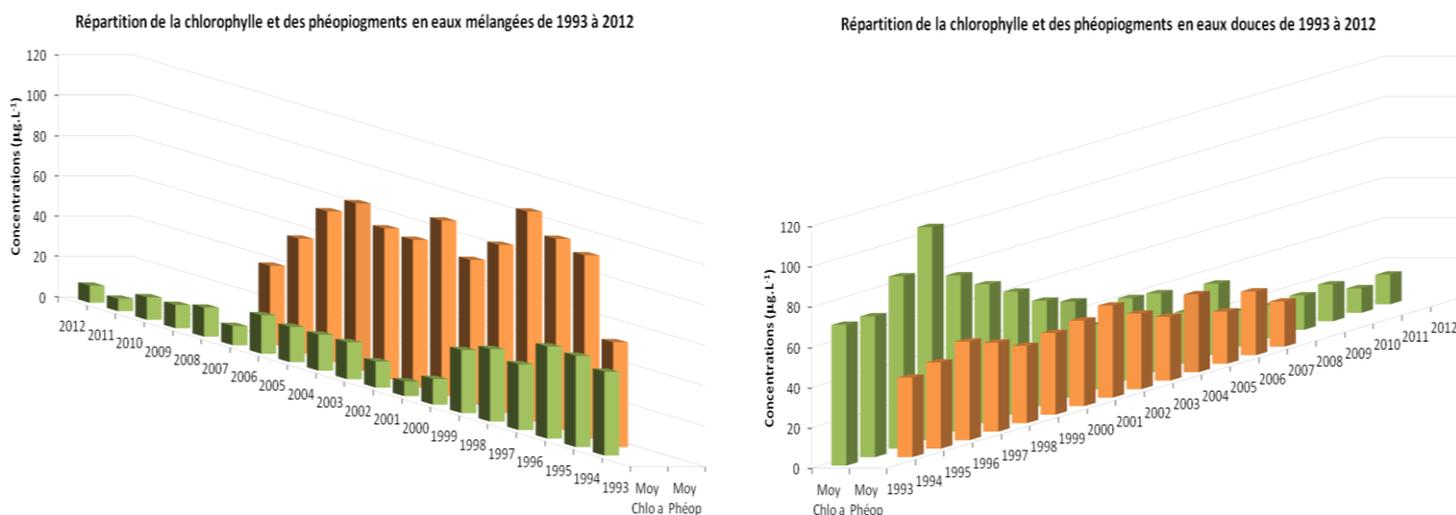


Figure 23 : Synthèse de la répartition de la chlorophylle a et des phéopigments dans les eaux mélangées et les eaux douces entre 1983 et 2012, date à laquelle les données existent pour chacun des six stations étudiées (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

Ici, le secteur des « eaux douces » est représenté par les 3 stations situées le plus en amont du secteur d'étude du GIP LE que sont PO, MJ et SL ; les eaux « mélangées » sont représentées par les 3 stations de la zone estuarienne aval, NA, CO et SN. La proportion de chlorophylle a en eaux douces est nettement plus élevée qu'en eaux mélangées confirmant les résultats précédents, avec une tendance à la diminution des concentrations qui s'observe sur la totalité du continuum fluvio-estuarien. Cette tendance n'est en revanche pas perceptible pour les phéopigments au regard des résultats ci-dessus.

Variations saisonnières et annuelles de la chlorophylle a à Montjean-sur-Loire, Cordemais et Saint-Nazaire/Mindin -

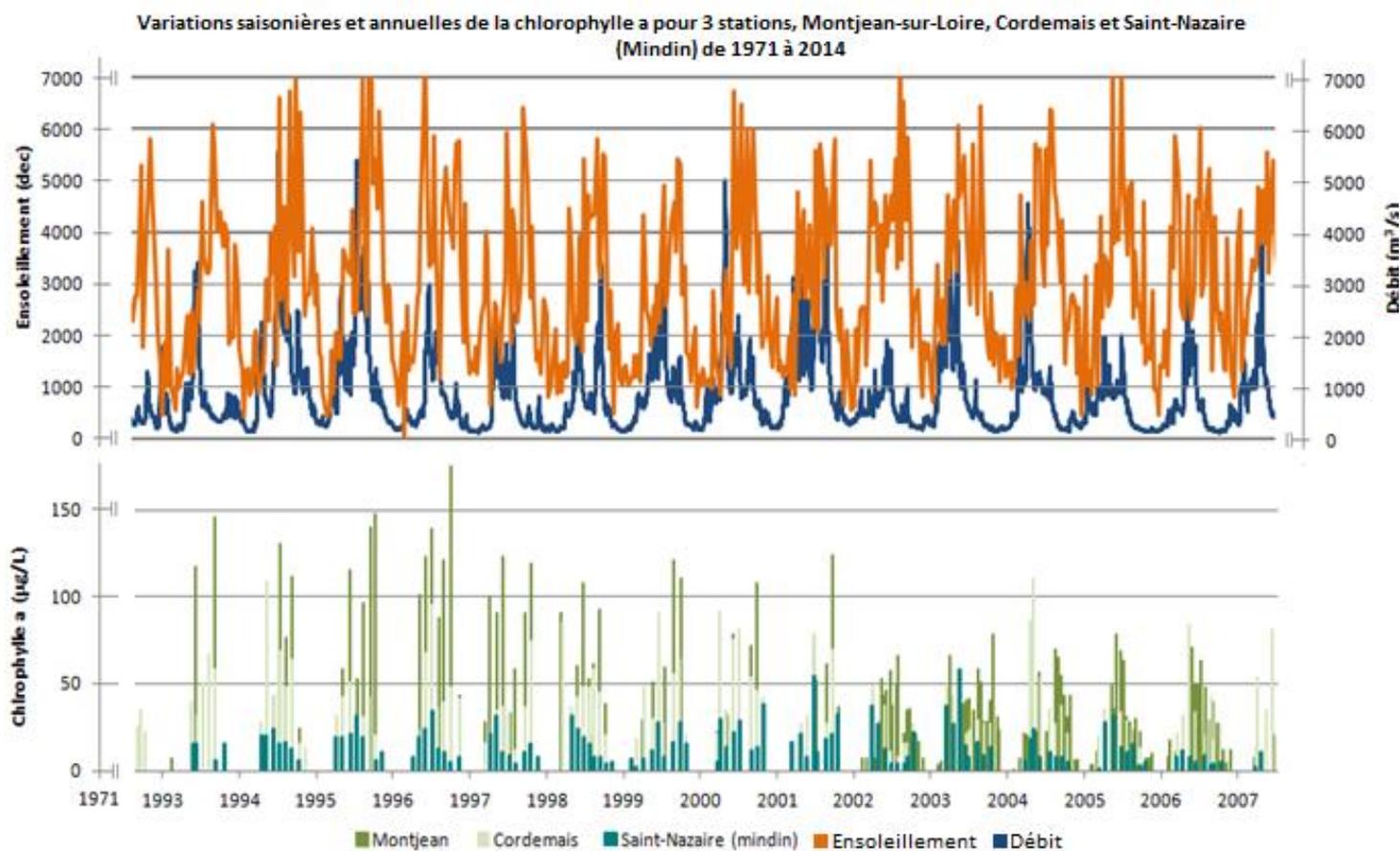


Figure 24 : Extrait de la synthèse des variations saisonnières et annuelles de la chlorophylle a pour 3 stations, Montjean-sur-Loire, Cordemais et Saint-Nazaire (Mindin) en fonction du débit à Montjean-sur-Loire et de l'ensoleillement à Nantes (Bouguenais), (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, Météo-France, GIP Loire Estuaire)

Les résultats présentés ci-dessus sont ceux des stations MJ (zone fluviale), CO (estuaire interne) et SN (estuaire interne) sur la période 1993 - 2007 correspondant à la période d'étude où les stations possèdent toutes trois des données. Les teneurs en chlorophylle *a* sont ici comparées à l'ensoleillement et au débit, qui sont deux paramètres indispensables au développement phytoplanctonique ; le premier indispensable à la photosynthèse et le second influençant les transferts amont-aval.

Les pics de concentrations en chlorophylle *a* sont obtenus en condition de faible débit, et de fort ensoleillement correspondant aux périodes estivale et printanière. Ces deux saisons constituent la période dite productive avec des conditions de pénétration de la lumière dans l'eau optimales et des conditions de faibles débits qui vont augmenter le temps de résidence des nutriments dans l'eau et limiter la turbidité par une faible remise en suspension des sédiments, essentiellement à l'amont de Nantes. A l'aval, la turbidité sera moindre en surface lors des épisodes de mortes eaux, lors de la décantation du bouchon vaseux. De plus, les pics de chlorophylle *a* ont diminué en intensité, entre 1993 et 2007 à La Possonnière (PO) : 175 µg/L en 1996 pour seulement 78,4 µg/L en 2006. La diminution des moyennes annuelles de concentrations sur la période 1994 – 2007, s'observe également le long du continuum fluvio-estuarien : MJ 75,5 µg/L en 1994 pour 16,4 µg/L en 2007 ; CO 48,8 µg/L en 1994 pour 30,4 µg/L en 2007 et SN 14,5 µg/L en 1994 pour 6,3 µg/L en 2007. Les conditions de débit et d'ensoleillement n'ayant pas évolué sur la période d'étude, il existe donc d'autres facteurs qui sont à l'origine de la diminution des teneurs en chlorophylle *a* au cours du temps. Au regard des résultats précédents, les hypothèses suivantes qui peuvent être émises :

- Malgré une capacité de la biomasse phytoplanctonique à prélever dans le milieu les éléments nécessaires à son développement en quantité très faible, il est envisageable que les tendances à la diminution du phosphore total au cours du temps dans le milieu ont eu un impact sur les communautés algales.
- Une évolution des communautés phytoplanctoniques au cours du temps avec des espèces qui auraient un cycle de développement différents de celles prospérant en Loire dans les années 1990-2000 : cycle de développement plus lent, temps de reproduction plus court etc.

c. Point d'union des deux fiches : L'eutrophisation

La mise à jour de ces deux fiches permet également de mettre en relief l'évolution de l'eutrophisation au cours de ces 40 dernières années à travers l'étude de ces deux principales composantes, que sont les nutriments et la biomasse phytoplanctonique par l'intermédiaire de la chlorophylle *a*. Elle permet également d'observer les relations entre les teneurs en chlorophylle *a* et l'oxygène dissous, les blooms phytoplanctoniques pouvant être à l'origine de crise d'hypoxie (voire d'anoxie) des eaux.

Evolution des concentrations et des flux de phosphates en lien avec l'Eutrophisation- Dans un premier temps, l'ensemble des analyses conduites précédemment sur les nitrates et le phosphore total ont été redéveloppées pour les phosphates, forme inorganique dissoute du phosphore (annexe 6). Globalement, les tendances à la diminution observées à SL pour les phosphates, sont les mêmes que pour le phosphore total avec des flux annuels moyens de phosphates à SL qui passent de 15440 t/an en 1981 à 8976 t/an en 2003. Les moyennes annuelles des concentrations sont en baisse pour les stations PO, MJ et SL entre 1971 et 2014. Bien que SL soit en milieu estuarien, cette tendance ne s'observe pas pour les trois stations soumises à l'influence de la marée dynamique, NA, CO et SN mettant en avant des interactions entre les différentes formes du phosphore et le milieu, qui diffèrent en conditions estuarienne et strictement fluviale.

En zone de mélange, plusieurs processus internes à l'estuaire peuvent être à l'origine des variations de concentrations des éléments phosphorés. La masse turbide fortement concentrée en MES va permettre une fixation du phosphore total. En période de mortes eaux et d'étiage du fleuve, le bouchon vaseux va sédimenter, le phosphore total pénétrant dans la crème de vase par adsorption puis dans les sédiments plus profonds par diffusion. En période de vives eaux et de crue du fleuve, l'agitation de la masse d'eau va générer une remise en suspension de ces sédiments. Le sel amené par la marée va favoriser la rupture des liaisons faibles existantes entre les MES et les éléments phosphorés et pouvant être à l'origine de son augmentation dans le milieu. En dehors de ce processus

estuarien, il existe aussi quelques remises en suspension lors des dragages d'entretien du chenal de navigation et des installations portuaires.

Evolution des concentrations en chlorophylle *a*, des nitrates et des phosphates de 1971 à 2014 –

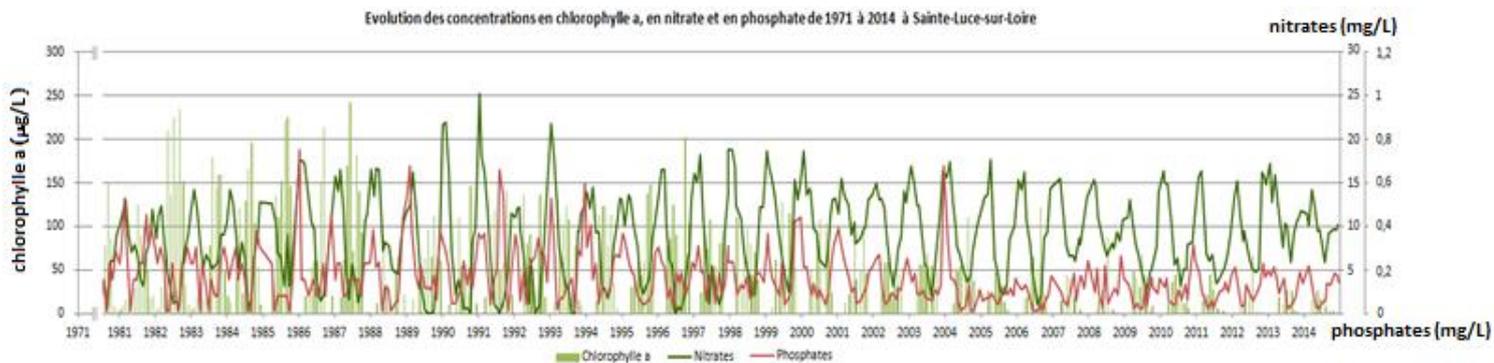


Figure 25 : Graphique de l'évolution des concentrations en chlorophylle *a*, nitrates et phosphates à Sainte-Luce-sur-Loire de 1981 à 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)

A Sainte-Luce-sur-Loire, les fortes teneurs en chlorophylle *a* traduisant un développement de la biomasse phytoplanctonique sont corrélées à l'abaissement des concentrations de nitrates et de phosphates dans le milieu. Le pic de chlorophylle *a* à 243 µg/L relevé à Sainte-Luce-sur-Loire le 4 juin 1987, est associé à des teneurs en nitrates et phosphates respectives de 2,09 et 0,09 mg/L. Ces diminutions peuvent être expliquées par une consommation intense des nutriments par la biomasse végétale en période productive.

Evolution des concentrations en chlorophylle *a* et en oxygène dissous à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014 –

Les crises d'hypoxie voire d'anoxie, qui peuvent s'observer suite à un phénomène d'eutrophisation, sont la conséquence d'une trop grande consommation d'oxygène lors de la re-minéralisation de la matière organique d'origine végétale produite en excès. Sur la période 1979 – 2014, cinq crises d'hypoxie (entre 2 et 5 mg/L) peuvent être observées à SL. Les pics de chlorophylle *a* sont souvent liés à une augmentation des concentrations en oxygène dans le milieu du fait que la photosynthèse va être à l'origine d'une production de glucose (sucres) et d'oxygène : $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$.

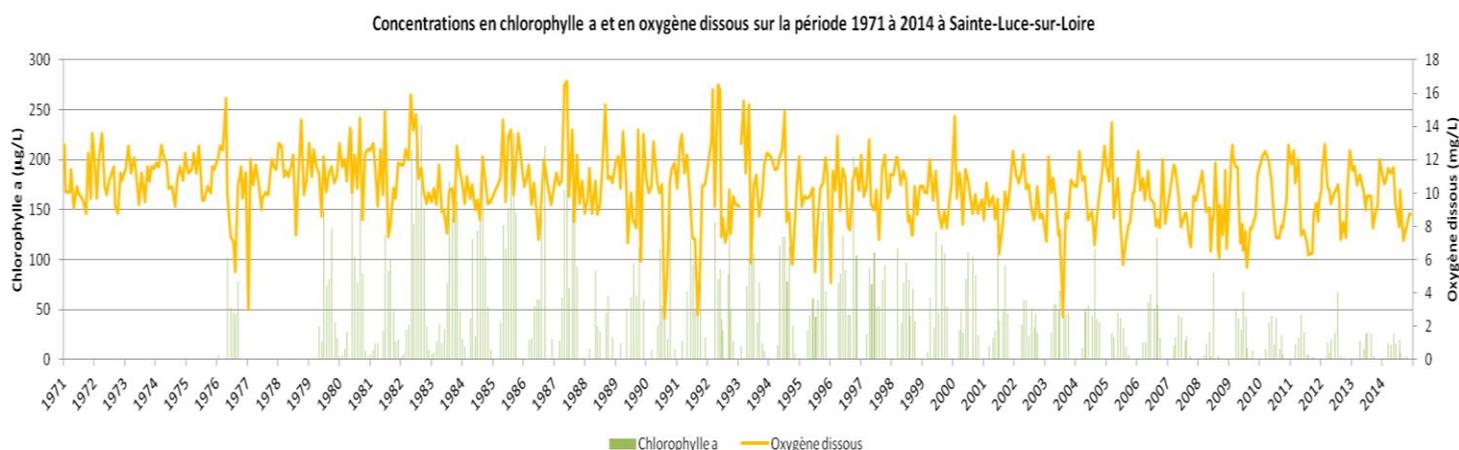


Figure 26 : Graphique de l'évolution de la concentration en chlorophylle *a* et en oxygène dissous à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

Cela s'observe à SL où les efflorescences algales des 4 mai et 5 juin 1987 culminent respectivement à 170 et 243 µg/L de chlorophylle *a*, et sont liées à des concentrations maximales en oxygène dissous de 16,5 et 16,7 mg/L aux mêmes dates. Ces pics de chlorophylle *a* sont généralement suivis d'une baisse des concentrations en oxygène dissous dans le milieu.

Sur l'ensemble du continuum estuarien, la concentration maximale en oxygène dissous est relevée à Nantes/Indre le 01/07/1985 pour une concentration de 17,7 mg/L, et correspond à une concentration de 150 µg/L de chlorophylle *a*.

Au total, pour toutes les stations ce sont près de 190 crises d'hypoxie et 39 d'anoxie (< 2 mg/L) qui sont relevées en Loire, de la Maine à la mer entre 1979 et 2014. Si l'ensemble des pics de chlorophylle *a* sont suivis d'une diminution des teneurs en oxygène, toutes ne débouchent pas nécessairement sur une crise d'hypoxie/anoxie laissant supposer l'intervention d'autres facteurs dans ces processus de désoxygénation de la masse d'eau.

d. Conclusion

La présente mise à jour a permis d'observer l'évolution de différents paramètres (nitrates, phosphore total, phosphates, chlorophylle *a*, phéopigments, oxygène dissous, débits) sur une période étendue d'au maximum 43 ans (cas de SL et NA) et dont les principales conclusions sont les suivantes :

- Les apports de nutriments en Loire sont corrélés au débit du fleuve, avec des concentrations observées faibles en période d'étiage et des concentrations plus élevées en période de crue ;
- Aucune tendance d'évolution significative n'est émise pour les nitrates. En revanche, une tendance à la diminution du phosphore total et des phosphates est visible à partir des années 1990, probablement du fait des nombreuses mesures de réduction, voire d'interdiction, prises à l'échelle européenne et nationale ;
- Il existe au sein de la masse turbide une double interaction entre le phosphore total et les phosphates et entre la colonne d'eau et les sédiments qui est à l'origine des fortes variations des teneurs en éléments phosphorés dans l'estuaire ;
- Une tendance à la diminution des teneurs en chlorophylle *a* et en phéopigments s'observe sur tout le continuum fluvio-estuarien ;
- La diminution des teneurs en nutriments (nitrates et phosphates) est fortement liée au développement phytoplanctonique constaté grâce à l'augmentation des concentrations en chlorophylle *a* associé, mettant en avant une consommation importante des nutriments en milieu aquatique par les communautés phytoplanctoniques ;
- Les blooms phytoplanctoniques sont associés à une augmentation des concentrations en oxygène dissous traduisant une bonne oxygénation de la masse d'eau en période productive. Les crises d'hypoxie, voire d'anoxie qui peuvent succéder un bloom, sont dues à la dégradation de la matière organique produite. La dégradation de la matière organique est un processus qui consomme de l'oxygène, lorsque la matière organique à dégrader est trop importante (cas des blooms), le processus de dégradation va être très consommateur d'oxygène. Cependant, la présente analyse ne permet pas d'affirmer que ces processus de désoxygénation de la masse d'eau sont toujours en lien avec une efflorescence algale, les données étant issues de mesures trop éloignées dans le temps ;
- L'étude de plusieurs stations permet d'observer les différents processus qui ont lieu sur tout le continuum fluvio-estuarien avec 3 stations amonts (PO, MJ, SL) qui présentent un comportement très différents des 3 stations aval (NA, CO, SN) essentiellement dû à l'influence de la marée dynamique et du bouchon vaseux pour ces trois dernières stations.

3.3. Contribution au programme de recherche DIETE

L'étude des séries à long termes permet de comprendre l'évolution de certains paramètres sur un pas de temps choisis et qui sont souvent affectées de différentes composantes qu'il convient de prendre en compte :

- la tendance ;
- la saisonnalité qui réapparaît de manière cyclique à intervalles réguliers ;
- les fluctuations aléatoires inexplicables qui se traduisent généralement par des variations accidentelles, des valeurs extraordinaires ou aberrantes. Ces valeurs peuvent être liées à des événements exceptionnels qu'il faut prendre en considération dans l'analyse ou bien comme des valeurs aberrantes liées à des erreurs de manipulation, d'analyse ou de bancarisation de données

Le but ici est produire une analyse préliminaire des données synthétisées en Loire sur le domaine d'étude du GIP Loire Estuaire, selon les méthodologies utilisées par Ifremer dans le cadre du programme de recherche DIETE.

3.3.1. ANALYSE DES SERIES TEMPORELLES SELON O'BRIEN & AL, (2012)

Afin d'étudier l'évolution au cours du temps des phénomènes d'eutrophisation en Loire, la méthode d'analyse des séries temporelles mise au point par le *Working Group on Phytoplankton and Microbial Ecology* (WGPME) du Conseil International pour l'Exploration de la Mer (CIEM) a été appliquée. Cette méthodologie est extraite d'un ensemble de méthodes d'analyse mise au point par Todd D. O'Brien, William K.W. Li, et Xosé Anxelu G. Morán dans leur ouvrage « *ICES⁶ Phytoplankton and Microbial Plankton Status - Report 2009/2010* » au chapitre «Time-series data analysis and visualization : the WGPME time-series analysis».

La méthodologie décrite dans ce chapitre a été réalisée de façon à permettre la comparaison des tendances interannuelles de plusieurs stations, au travers d'une multitude de variables hydrogéologiques présentant des unités et des fréquences de mesures différentes. En effet, cette méthode repose sur la détermination d'un ratio logarithmique sans unité appelé « anomaly » et d'une moyenne réalisée sur le long terme qualifiée de « climatology ». De ce fait, les biais d'échantillonnage, les pics saisonniers ou les lacunes de données observables à certaines périodes de l'année, sont limités par l'utilisation des moyennes selon la méthode de *Mackas & al (2001)*. Si le signal saisonnier est éliminé par l'application de cette méthode, la comparaison inter et intra stations des résultats repose sur la transformation logarithmique des valeurs.

a. Matériels et méthodes

Le calcul des anomalies et la création des graphiques permettant leur visualisation implique une série d'étapes de calcul :

- compilation des données ;
- visualisation des valeurs de mesures à 0 (valeurs nulles) et des valeurs seuils ;
- définition des moyennes mensuelles et transformation logarithmique ;
- calcul de la moyenne à long terme de chaque mois = « *climatology* » ;
- calcul des anomalies ;
- calcul des moyennes annuelles et des moyennes saisonnières ;
- analyse des tendances par régression linéaire classique ;

Les variables choisies pour la réalisation de cette analyse statistique sont en lien plus ou moins direct avec la thématique de l'eutrophisation. Les concentrations en chlorophylle *a* et en phéopigments ainsi que les concentrations en sels nutritifs (nitrates, nitrites, ammonium, phosphore et silicates) ont été retenues tout comme les paramètres de débit, et de température. Cette analyse concerne les 6 stations étudiées pour la mise à jour des indicateurs du GIP Loire Estuaire (PO, MJ, SL, NA, CO et SN). Enfin, l'ensemble des données disponibles sur la période d'intérêt, de 1970 à aujourd'hui, regroupées dans la base de données à destination du GIP Loire estuaire ont été reprises comme données de base pour cette analyse.

Compilation des données - Cette première étape de préparation des données, permet de calculer les concentrations en azote inorganique dissous (DIN « Dissolved Inorganic Nitrogen »). Les concentrations en DIN sont obtenues à partir des concentrations de nitrates, nitrites, d'ammonium. Cependant, les concentrations massiques ne sont pas additives, il a donc été nécessaire de déterminer les concentrations molaires des différents sels nutritifs afin d'obtenir des valeurs en $\mu\text{mol.L}^{-1}$.

⁶ ICES : International Council for the Exploration of the Sea. Aussi appelé CIEM, Conseil International pour l'Exploration de la Mer, l'ICES est un organisme intergouvernemental créé en 1902 qui assure la coordination des recherches de la zone Atlantique Nord-est dans le domaine de l'environnement marins. (source : www.ices.dk)

Détermination des concentrations molaires – cas du DIN

Les concentrations molaires s'obtiennent à partir des concentrations massiques par le biais de la formule :

$$\text{Concentration molaire} = \frac{\text{Concentration massique}}{\text{Masse molaire}}$$

La détermination de la masse molaire des éléments azotés repose sur les unités de masse atomique qui équivaut à 1 pour l'atome d'hydrogène (H), 14 pour l'azote (N) et 16 pour l'oxygène (O).

Pour les nutriments inorganiques dissous du DIN, on obtient les masses molaires suivantes : $M[\text{NO}_3^-] = (1 \times 14) + (3 \times 16) = 62 \text{ g.mol}^{-1}$; $M[\text{NO}_2^-] = 46 \text{ g.mol}^{-1}$; $M[\text{NH}_4^+] = 18 \text{ g.mol}^{-1}$

De plus, afin d'être représentatives des apports fluviaux stricts, les données utilisées ici sont uniquement celles issues de prélèvements réalisés à basse mer. En effet, pour les stations situées dans la partie aval du fleuve, sous influence de la marée dynamique (de Saint-Nazaire à Sainte-Luce-sur-Loire), les prélèvements réalisés à pleine mer vont être influencés par les apports océaniques et ne seront donc pas représentatifs des concentrations fluviales strictes.

Visualisation des valeurs de mesures à 0 et des valeurs seuils - La méthodologie mise au point par le WGPME permet d'inclure dans une série à long terme les valeurs mesurées à 0. En effet, contrairement aux données absentes, les valeurs nulles fournissent une information « cherché et trouvé absent » (O'Brien & al, 2012) et doivent donc être prises en compte. Il en est de même pour les valeurs inférieures aux seuils de quantifications ou supérieures aux limites de saturation qui constituent une source de donnée et fournissent des informations. Afin d'inclure les valeurs nulles dans la détermination des anomalies et de pouvoir transformer ces dernières en logarithme, la méthode dite des « ZERO-REP » a été développée par le WGPME. Celle-ci consiste en un remplacement des valeurs nulles entrantes par une valeur fixe nommée « zero-representation value », correspondant à la moitié de la plus petite valeur non nulle d'une même variable dans le flux de donnée entier (par exemple, pour une série de données variant de 10 à 20, la « zero-representation value » sera de 5).

Dans notre étude, afin de prendre en compte les valeurs inférieures aux seuils de quantification, cette méthode des « ZERO-REP » a été appliquée.

Variable	Variations dans le flux de données entrants	
	Valeurs seuils	Valeurs obtenues
Nitrate NO_3^-	0,01 à 1	0,005 à 0,5
Nitrite NO_2^-	0,005 à 0,3	0,0025 à 0,15
Ammonium NH_4^+	0,01 à 1	0,005 à 0,5
Chlorophylle a <i>Chl a</i>	0,5 à 1	0,25 à 0,5
Phéopigment <i>phe</i>	0,5 à 1	0,25

Tableau 10 : Variations des valeurs seuils dans le flux de données entrants et valeurs finales

Dans un premier temps, la méthode des « zero-rep » a donc été appliquée aux valeurs seuils. Ces dernières sont variables selon les paramètres mesurés, les producteurs de données, le protocole de prélèvement et d'analyse et peuvent également varier d'une année à l'autre. Les valeurs seuils ont donc été toutes divisées par deux afin d'obtenir une valeur fixe pouvant être introduite dans le flux de données entrant (tableau 10).

Une fois ces valeurs obtenues, il est possible de déterminer la « zero-representation value » des valeurs nulles, en sélectionnant la plus petite valeur dans le flux entier de donnée (recherche de la plus petite valeur d'une même variable pour toutes les stations sur l'ensemble de la chronique) (tableau 11).

Variable	Valeur minimal du flux de donnée	Zero-representation value
Nitrate NO_3^-	0,005	0,0025
Nitrite NO_2^-	0,002	0,001
Ammonium NH_4^+	0,004	0,002
DIP	0,005	0,0025
Chlorophylle a <i>Chl a</i>	0,25	0,125
Phéopigment <i>phe</i>	0,25	0,125

Tableau 11 : Synthèse et origine des "zero-representation value"

	A	B	C	D	E	F
1	Année	Mois	Mois	Saison	Valeur_i	Valeur
22	1993	septembre	9	4	0,002	0,002
23	1993	octobre	10	4	11,1	11,1
56	1996	juillet	7	3	1	1
57	1996	août	8	3	0,25	0,25
58	1996	septembre	9	4	0,25	0,25
59	1996	octobre	10	4	3,3	3,3

Traçabilité des valeurs modifiées

Dans le fichier excel associé, les données brutes transformées selon cette méthode (*Valeur_i* pour valeur initiale) servent à la définition des données qui seront utilisées dans la suite des calculs (*Valeur*). Ces dernières sont donc mises en évidence dans la base de données ; fond gris pour les valeurs seuils et fond bleu pour les valeurs nulles.

Définition des moyennes mensuelles et transformation logarithmique - L'ensemble des données sont donc maintenant toutes, non nulles, et peuvent être soumises à une transformation logarithmique. En dehors des paramètres abiotiques (température et débit : « *During this step, plankton, chlorophyll, and nutrient values are log₁₀ transformed, whereas temperature and salinity values are not* »), chaque variable les moyennes mensuelles de chaque année sont déterminées individuellement avant d'être log-transformées en base 10.

Calcul de la moyenne à long terme de chaque mois « climatology » - La valeur de « climatology » représente la moyenne à long terme d'un mois de l'année. En pratique cette dernière se détermine par la moyenne des valeurs d'un mois donnée sur l'ensemble de la chronique avant d'être log-transformée (sauf les paramètres abiotiques).

Exemple : Détermination de la valeur de climatology du mois de janvier sur la chronique 2000-2014

$$\text{Climatology}_{[\text{janvier}]} = \frac{(\bar{x}_{\text{janvier}2000}) + (\bar{x}_{\text{janvier}2001}) + \dots + (\bar{x}_{\text{janvier}2014})}{\text{nombre de mois de janvier de la chronique}}$$

Calcul des anomalies « anomaly » - La détermination des anomalies se fait par soustraction de la moyenne mensuelle d'une année et de la valeur de climatology précédemment définie.

Exemple : Détermination de l'anomalie du mois de janvier 2001 sur la chronique 2000-2014

$$\text{Anomaly}_{[\text{janvier}2001]} = \bar{x}_{\text{janvier}2001} - \text{Climatology}_{[\text{janvier}]}$$

Calcul des moyennes annuelles et saisonnières et représentation graphique - Afin de limiter les biais pouvant être dus à la saisonnalité ou à la fréquence d'échantillonnage, la méthode de *Mackas & al. (2001)* est utilisée par le WPGME pour établir les anomalies annuelles. Ces dernières sont donc calculées comme la moyenne des anomalies mensuelles sur une année.

Dans le but d'apporter des informations plus précises sur l'évolution des différentes variables au cours du temps, cette même opération fut réitérée pour les saisons. En dehors de la chlorophylle *a* et des phéopigments, les moyennes saisonnières de l'ensemble des variables furent déterminées pour la saison hivernale (décembre, janvier, février) et estivale (juin, juillet, août). En période hivernale, les températures basses et le faible taux de pénétration de la lumière dans l'eau ne permettent pas un développement phytoplanctonique massif avec des mesures de chlorophylle *a*/phéopigments qui sont souvent absentes. De ce fait, la période hivernale n'est pas étudiée pour ces variables et est remplacée par la période printanière (mars, avril, mai).

Les anomalies saisonnières sont donc déterminées, par saison, sur des périodes de 3 mois avec des calculs de moyenne qui sont donc effectués, en théorie, sur trois valeurs. En pratique, les données recueillies ne sont pas homogènes et il est apparu que certaines données mensuelles étaient absentes au sein des différentes chroniques étudiées. Les moyennes réalisées sur deux valeurs sont peu représentatives, et n'ont été gardées que les anomalies qui avaient été déterminées à l'aide de trois valeurs au minimum.

Dans le but de pallier à cette lacune liée à une saisonnalité de trop courte durée (3 mois), le calcul des anomalies a été réalisé sur une période plus longue, en fonction de l'hydraulicité dont la période s'échelonne sur 6 mois. En effet, une année peut être considérée selon deux périodes :

- Une période d'étiage, dite de basses eaux, de mai à octobre ;
- Une période de crue, dite de hautes eaux, de novembre à avril.

La périodicité étant ici de 6 mois, le nombre de valeurs permettant le calcul des anomalies est de ce fait plus élevé, avec un minimum de trois valeurs qui est donc plus souvent observés que dans le cas précédent. En effet, la majorité des données récoltées existent pour une fréquence moyenne de 0,98 valeur/mois. La probabilité d'avoir au minimum 3 valeurs, est plus élevée sur une période de 6 mois, et justifie son utilisation.

Sur les représentations graphiques, les anomalies sont représentées de manière uniforme selon la méthode décrite par *O'Brien & al (2012)* ; les anomalies négatives sont indiquées en bleu, tandis que les anomalies positives sont indiquées en rouge.

Analyse des tendances par régression linéaire classique et représentation graphique - Une fois l'ensemble des anomalies mensuelles, annuelles et saisonnières déterminées, il est possible de mettre en avant les tendances d'évolution, quand elles existent, par régression linéaire simple. La régression linéaire est une méthode statistique qui permet d'étudier la relation pouvant exister entre deux variables. Dans la pratique, elle se traduit par la formation d'une droite la plus représentative possible d'un nuage de point pour une série donnée par la technique dite des « moindres carrés ». Dans notre étude, les droites de régression ne sont représentées que si celles-ci sont significatives ($p < 0,05$), et sont définies à partir des nuages de points pour une optimisation des résultats.

b. Résultats

Les résultats relatifs à l'utilisation de cette méthode sont regroupés par paramètre en annexe (annexe 7). Ne sont présentés ici que les résultats annuels des principales variables. Les résultats des découpages saisonniers seront discutés dans la partie suivante et sont également en annexe. Pour rappel, les stations étudiées ici, sont : La Possonnière (PO), Montjean-sur-Loire (MJ), Sainte-Luce-sur-Loire (SL), Nantes/Indre (NA), Cordemais (CO) et Saint-Nazaire/Mindin (SN).

Les éléments nutritifs –

Le DIN : Au cours de ces quarante dernières années (de 1971 à 2014), les tendances annuelles sont à la hausse pour les stations de SL, NA et CO. Alors qu'à la station de PO, après une hausse de 1982 à 2000, la tendance est à la baisse jusqu'en 2012 (dernière année analysée). Pour les stations PO, MJ, SL et NA, les concentrations en micromole/Litre ($\mu\text{mol/L}$) varient globalement du simple au double sur la période d'étude.

En s'intéressant à la station PO, la concentration moyenne annuelle la plus élevée s'observe pour l'année 2000 à environ $340 \mu\text{mol/L}$. Avec une moyenne de $229 \mu\text{mol/L}$ sur toute la chronique pour cette station, les concentrations en DIN sont plus élevées que sur les autres stations.

Les phosphates : Pour toutes les stations étudiées, le comportement général des phosphates observé est similaire : les concentrations augmentent progressivement jusqu'au milieu des années 1990 avant de décroître à des niveaux deux fois inférieurs à ceux observés au milieu des années 1980, en fin de chronique (2012 ou 2014 en fonction des stations). Par exemple, la station NA dont les concentrations moyennes en phosphates sont de $0,34 \text{ mg/L}$ en 1976, augmentent à $0,41 \text{ mg/L}$ en 1989 avant de diminuer à $0,14 \text{ mg/L}$ en 2014.

Les silicates : Les données recueillies sont trop hétéroclites et ne permettent pas l'élaboration d'un suivi sur le long terme. Aucune observation ou tendance ne peut être déduite compte tenu des faibles résultats obtenus.

Le phytoplancton – Les courbes de tendance, indiquent que l'évolution des concentrations en chlorophylle *a* est à la baisse sur toute la période d'étude, de 1976 à 2014. Concernant les phéopigments, la tendance à la diminution ne s'observe qu'à partir des années 1990. Antérieurement, les moyennes annuelles de concentration sont, soit stables

(cas de PO dont les moyennes annuelles se stabilisent à environ 80 µg/L), soit sujettes à une légère augmentation (cas de NA dont les concentrations varient entre 45 et 80 µg/L).

Les concentrations moyennes en chlorophylle *a* sur toute la période d'étude varient peu : PO (55,8 µg/L), MJ (42,6 µg/L), SL (57,08 µg/L), NA (50,5 µg/L) et CO (43 µg/L) contrastant avec les moindres valeurs à la station de SN (15,3 µg/L). Globalement, les teneurs en chlorophylle *a* et en phéopigments ont très fortement diminué depuis les années 1980, avec des valeurs moyennes annuelles qui sont devenues inférieures aux valeurs moyennes des 35 dernières années à partir des années 2000 (tableau 12). L'année de rupture correspond à l'année de la chronique où la moyenne annuelle des concentrations est devenue inférieure à la moyenne annuelle des concentrations de la chronique entière.

	Période d'étude	Valeur moyenne de la chlorophylle a sur la chronique	Valeur moyenne des phéopigments sur la chronique	Année de rupture – Chlorophylle a	Année de rupture - Phéopigments
PO	1982 – 2012	55,8	24,3	1999	1999
MJ	1993 – 2014	42,6	19,06	2002	1999
SL	1976 – 2014	57,08	28,86	2001	2007
NA	1979 – 2014	50,5	46,8	2001	2007
CO	1982 – 2014	43,9	72,31	2005	2004
SN	1993 - 2007	15,3	38,05	2004	2004

Tableau 12 : Mise en avant du constat de forte diminution des concentrations en chlorophylle *a* et en phéopigment à partir de leur année de rupture respective (année où la valeur de la moyenne annuelle est devenue inférieure à la moyenne annuelle de la chronique entière)

Les paramètres abiotiques – Les anomalies relatives à la température de l'eau et au débit (mesuré à la station de référence MJ) ont également été étudiées afin d'observer leur évolution au cours du temps.

Température : L'évolution de la température montre une tendance à l'augmentation (1°C en moyenne) pour toutes les stations à l'exception de CO, où une légère diminution des températures est observée à partir des années 1990. Sur la période d'étude 1970-2014, les températures moyennes sur l'ensemble des stations étudiées varient de 13,8 à 15,4 °C. Des années exceptionnelles sont à retenir comme l'année 2009 à PO, qui présente une température annuelle moyenne de 21,7 °C ou les années 1990 et 1991 pour des températures annuelles moyennes respectives de 19,7 et 18,4 °C à CO.

Débit : Les résultats montrent une légère diminution sur la période d'étude 1970-2014, avec un débit moyen qui diminue de l'ordre de 60 m³/s, sans qu'il n'y ait cependant de tendance significative. Sur les 44 ans d'étude, le débit moyen à la station de référence MJ est évalué à 880,8 m³/sec. Comme pour la température, des années exceptionnelles peuvent également être observées : 1977 (1410 m³/s), 1981 (1317 m³/s), 1994 (1330 m³/s) et 1989 (423 m³/s), 1990 (437 m³/s) et 2011 (424 m³/s).

c. Discussion

Les résultats précédemment présentés sont discutés dans cette partie et une analyse critique de la méthodologie et des données sera faite dans la partie suivante.

DIN : Les tendances saisonnières sont similaires aux tendances annuelles d'évolution du DIN pour toutes les stations, à l'exception des 3 stations situées le plus en aval (NA, CO et SN) sur la période des « hautes eaux ». Concernant ces 3 stations, la tendance entre la période des « basses eaux » et des « hautes eaux » n'est pas la même pouvant suggérer une inversion des tendances au cours de l'année.

L'augmentation des concentrations en DIN observée pour les trois stations situées en amont de notre secteur d'étude (PO, MJ et SL) se produit toute l'année indépendamment des saisons. Le phosphore étant le facteur limitant dans la majorité des systèmes d'eau douce, l'hypothèse que l'augmentation en DIN observée ici, soit dû à une limitation du développement phytoplanctonique par le phosphore en Loire et donc, à une non consommation de l'azote, est envisageable.

Phosphates : La diminution observée pour les phosphates par cette méthode est du même ordre que la tendance à la diminution observée pour la mise à jour des suivis, avec des hypothèses de diminution liées aux mesures restrictives prises à l'échelle européenne et nationale qui sont identiques.

Chlorophylle a : L'hypothèse d'une corrélation entre la diminution des phosphates et la diminution de la chlorophylle a peut être émise du fait que ces diminutions présentent un ordre de grandeur relativement similaire et des dates clefs (1990 et 2000) identiques : début 1990, début de la diminution de la biomasse phytoplanctonique (premières mesures sur les phosphates) ; milieu des années 2000, accentuation de la diminution des concentrations en chlorophylle a (intensification des mesures restrictives sur les phosphates). La légère augmentation des concentrations en chlorophylle a à CO et SN sur la décennie de 1980 à 1990 peut s'expliquer par l'absence de mesures restrictives sur les phosphates à cette période ainsi que par une dominance maritime en période de « basses eaux » sur ce secteur, où l'azote devient limitant au détriment du phosphore. Cependant, le nombre de valeurs recueillies en période hivernale est faible. Les anomalies annuelles calculées ici, reflètent majoritairement les valeurs de la période productive. En effet, la période estivale va mettre en avant la biomasse d'été (dite régénérée) correspondant au deuxième bloom phytoplanctonique annuel, le premier étant mis en avant par la période printanière.

Les concentrations moyennes de la chlorophylle a sont, en moyenne, plus faibles à CO et SN que sur les autres stations. Ces faibles concentrations peuvent s'expliquer par la présence du bouchon vaseux la majeure partie de l'année sur ces deux stations avec une turbidité élevée, ne permettant pas une bonne pénétration de lumière et qui peut être à l'origine d'une limitation du développement phytoplanctonique. De plus, ces deux stations sont sous forte influence de la marée dynamique, avec une salinité qui peut engendrer la mort des communautés phytoplanctoniques d'eau douce, réduisant ainsi la biomasse vivante.

Température et débit : Concernant l'évolution des paramètres abiotiques au cours de ces 45 dernières années, les tendances sont moins fortes. L'observation d'une très légère diminution des débits en Loire peut s'expliquer par une augmentation des pressions anthropiques sur le bassin versant (aménagement hydraulique de la voie d'eau, bassins de rétention...), ainsi que par une modification des conditions climatiques. Cette tendance à la diminution est confirmée par les résultats du projet HYDROQUAL, mené sur le bassin versant de la Loire, dont les projections au XXI^{ème} siècle attestent d'une diminution des débits moyens en Loire du fait de la grande variabilité des débits saisonniers (diminution des débits moyens de crue et allongement des périodes d'étiage).

Concernant la température, si aucune tendance n'est observable pour la période des « hautes eaux », l'augmentation des températures estivales peut s'expliquer par l'accentuation du phénomène de réchauffement climatique sur notre période d'étude. S'il est difficile d'expliquer l'augmentation de la température moyenne à PO, celle de 1991 à CO peut éventuellement s'expliquer par la présence de la centrale thermique EDF de Cordemais. Construite en 1967, la centrale thermique de Cordemais⁷ prélève de l'eau en Loire pour refroidir ces installations de production électrique, et est autorisée à rejeter l'eau « réchauffée » dans le respect d'un delta de température qui est fonction des températures moyennes de l'eau, afin de limiter l'impact des rejets. En 1991, cette centrale connaît des records de production d'énergie pouvant éventuellement expliquer une élévation ponctuelle de la température (+3 °C en moyenne sur l'année).

d. Limites

L'utilisation de certaines données, même si elles sont pertinentes au regard de la thématique étudiée n'est pas toujours possible en fonction des données recueillies. C'est le cas des silicates, dont l'étude de l'évolution peut être intéressante pour la répartition des populations de diatomées le long du continuum fluvio-estuarien. Toutes les stations étudiées présentent une grande discontinuité d'acquisition de la donnée, qui ne permet pas un suivi à long

⁷ Source : www.energie.edf.com consulté le 12/08/2015

terme mais seulement des analyses ponctuelles. Ces lacunes soulèvent de nombreuses questions quant aux comportements et à l'évolution des communautés de diatomées en particulier, la silice étant généralement le facteur limitant de leur développement.

Concernant l'analyse des nitrites et de l'ammonium, la difficulté est la même sauf que celle-ci est due, non pas à une absence de données, mais à la méthodologie en elle-même. En effet, l'application d'un logarithme en base 10 sur des valeurs faibles, comme c'est le cas des concentrations en nitrites et en ammonium peut aboutir à des résultats très proches, très inférieurs à 1 et, pouvant refléter des tendances qui ne sont pas pertinentes à analyser. Cette méthodologie d'application des logarithmes n'est également pas une méthode très pédagogique.

L'étude de l'ammonium, présent en quantité très faible dans le milieu est intéressante pour l'obtention de résultats qualitatifs. Cependant, dans le cas de la méthode des anomalies où le but est d'observer une évolution des concentrations, les résultats attendus sont de l'ordre du quantitatif et ne sont donc pas très exploitables sur une période de 45 ans.

Si l'utilisation de la méthode de *Mackas & al, (2001)* permet de limiter le poids des données aberrantes dans l'interprétation des résultats (erreurs de manipulation lors du prélèvement, erreurs de bancarisation des valeurs, valeurs seuils, etc.) par l'utilisation de moyenne et de logarithme, cette méthode requiert une succession de calculs et de mise en forme des données (harmonisation des unités de mesure, calcul du DIN, etc.) qui s'est avérée chronophage (9 paramètres étudiés pour chacune des six stations d'étude choisies).

Enfin, en fonction des données existantes, les moyennes annuelles calculées ne sont pas toujours représentatives de l'année entière mais seulement de la partie de l'année pour laquelle il existe des données bancarisées : c'est le cas de la chlorophylle *a* par exemple, dont les moyennes annuelles sont contrôlées par les moyennes estivales et printanières ; les valeurs automnales et hivernales n'existant pas pour la grande majorité des stations avant 1995. Enfin, la décision de ne prendre qu'un minimum de trois valeurs pour établir une moyenne peut être discutable dans la mesure où la saison préliminaire choisie s'échelonne sur 3 mois. Comme présenté précédemment (cf. partie 3.1.3), la fréquence moyenne d'acquisition de la donnée est inférieure à 1 pour la majorité des stations (PO 1,03 ; MJ 1,54 ; SL 0,95 ; NA 0,91 ; CO 0,84 et SN 0,9) avec la probabilité de ne pas toujours avoir une donnée mensuelle. C'est dans cette optique que, dans le cas de la Loire, la saisonnalité a été remplacée par la période des « hautes » et « basses » eaux qui s'échelonne sur une période plus longue de 6 mois.

3.3.2. ANALYSE DES SERIES TEMPORELLES SELON PETRIS & AL, (2010)

L'objectif de cette seconde approche est d'observer les tendances et les variations saisonnières sur le long terme par application d'un modèle linéaire dynamique.

La possibilité d'utiliser un modèle dynamique linéaire, part du constat que les séries saisonnières sont généralement des séries dites « non stationnaires », c'est-à-dire qu'elles présentent des données exceptionnelles ou des fréquences d'échantillonnage irrégulières. Dans leur fonctionnement, les Modèles Linéaires Dynamiques (DLM – « Dynamic Linear Model ») sont proches des modèles de régression linéaire classique. Leur différence réside dans le fait que les DLM vont supposer que les paramètres choisis peuvent être variables dans le temps (exemple : possibilité d'observer deux blooms phytoplanctoniques, printanier et estival au cours d'une même année). De ce fait, les DLM sont adaptés à l'analyse des séries temporelles par la prise en compte de l'ensemble des variables qui les caractérisent.

Dans sa forme simplifiée, le DLM appliqué dans cette étude s'exprime selon la formule suivante :

$$Y_t = mt + St + vt \sim N(0, Vt)$$

Y_t représente l'observation, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs qui sont observées pour nos différents paramètres d'intérêt. Cette dernière se décompose en deux entités principales que sont : la tendance sur le long terme (mt) et la saisonnalité variable dans le temps (St). A ces deux entités, est associé un terme d'erreur (vt) qui correspond au biais pouvant être initié lors l'échantillonnage ou par l'absence de données. En statistique, ce biais est appelé « bruit

environnemental ». Les deux entités principales m_t et S_t forment « le signal sous-jacent inobservable ». Ce dernier correspond au signal qui serait observé en l'absence du bruit environnemental, c'est-à-dire en l'absence d'erreur de manipulation, de stockage, de bancarisation de la donnée, de fréquence d'échantillonnage etc. Il représente en fait le signal « idéal » qui serait obtenu si les fréquences d'échantillonnage et les méthodes de prélèvements et d'analyse des données étaient constantes dans le temps ainsi que si aucune erreur liée à l'environnement⁸ de la donnée n'étaient possible.

Le DLM présenté ici sera donc intégré dans un programme sous logiciel R dans le but d'obtenir des représentations graphiques de la saisonnalité sur le long terme pour l'ensemble de nos stations et de nos paramètres d'intérêt.

a. Matériels et méthode

En dehors de la salinité et de la température, les paramètres initialement retenus sont les mêmes que pour l'analyse précédente (nutriments, chlorophylle a , phéopigments et débit), tout comme les stations : La Possonnière (PO), Montjean-sur-Loire (MJ), Sainte-Luce-sur-Loire (SL), Nantes/Indre (NA), Cordemais (CO) et Saint-Nazaire/Mindin (SN).

A l'instar de la première étude, l'obtention de résultats par utilisation du programme R requiert un certain nombre d'étapes de mise en forme et de vérification :

- compilation et encodage des données historiques ;
- expertise *a priori* et *a posteriori* ;
- visualisation et interprétation graphique

Compilation et encodage des données - L'intégration des données dans le programme R nécessite un encodage bien précis qu'il convient de mettre en corrélation avec la base préexistante contenant les données brutes. Les champs devant *a minima* être remplis sous Excel pour pouvoir faire fonctionner le modèle sont au nombre de 19 (tableau 13). Ces champs permettent de fournir des données de base comme la date, le lieu de prélèvement ou encore la valeur du résultat. Si les données de base sont indispensables au bon fonctionnement du modèle, les éléments complémentaires peuvent apporter une aide non négligeable dans la compréhension des résultats et dans les expertises *a priori* et *a posteriori* qui en découlent (technique de prélèvement, méthodologie, niveau de qualité du prélèvement etc.). Une fois complétés, ces fichiers sont convertis au format CSV et intégrés dans le programme sous R.

Développé par Ifremer, l'intitulé des champs du modèle reprennent ceux présents dans la base de données Quadrigé et fournissent des informations relatives aux campagnes de prélèvements menées par Ifremer (code des programmes, mnémorique...). Il est cependant possible de trouver des correspondances avec les champs de la base de données du GIP LE, voire d'y introduire d'autres informations (tableau 13).

⁸ Environnement de la donnée : Tout ce qui caractérise une donnée de son prélèvement à son utilisation dans une étude : prélèvement, conditionnement, stockage, acheminement, analyse, bancarisation etc.

Tableau 13: Synthèse des champs nécessaire au bon fonctionnement du DLM et correspondance avec la base de données du GIP Loire Estuaire

Champ à remplir <i>a minima</i>	Correspondance	Exemple de remplissage
Lieu.de.surveillance:libelle	Nom de la station	Montjean
Lieu.de.surveillance:mnemonique	Référence Quadrige de la station	070 – G - 002
Passage:date	Date de prélèvement	12/01/2005
Prelevement:niveau		Surface (0-1m)
Prelevement:symbol.de.l.unite. d.immersion		m
Echantillon:identifiant.interne	Code de l'échantillon à destination des laboratoires d'analyse (correspondance OSUR Prel_Code)	162297
Echantillon:commentaire.de.qualifi cation	Commentaire permettant de qualifier la qualité d'un échantillon (correspondance OSUR Prel_Commentaire)	MARCHE NON NOTIFIE POUR LES MICROPOLLUANTS
Resultats:code.des.programmes.4	Code d'analyse justifiant des résultats d'analyse inférieurs/supérieurs aux valeurs seuils3 (correspondance OSUR Anal_code_remarque)	1
Resultats:code.des.programmes.5	Code SANDRE	1340
Resultats:code.des.programmes.6	Sources des données	AELB
Resultats:code.parametre		NO ₃
Resultats:valeur.de.la.mesure		16
Resultats:valeur.unite.de.mesure.a ssocie.au.quadruplet		milligramme par litre
Resultats:libelle.methode	Nom de la méthode d'analyse utilisée (correspondance OSUR Anal_Methode_libelle)	Inconnue
Resultats:code.service.analyse	Code SANDRE du service analyste (correspondance OSUR Anal_Prod_SANDRE)	1,84503E+13
Resultats:libelle.service.analyse	Nom du service analyste (correspondance OSUR Anal_Prod_raison_social)	AGENCE DE L'EAU LOIRE-BRETAGNE
Resultats:commentaire.de.qualifica tion	Commentaire permettant de qualifier la qualité de l'analyse (correspondance OSUR Anal_Qualification_libelle)	Correcte
Resultats:symbole.unite.de.mesure .associe.au.quadruplet		mg(NO ₃)/L
Resultats:libelle.parametre		Nitrates

Dans notre cas, un champ « *Resultats : fraction* » a été créé dans le but de connaître la fraction analysés aboutissant à nos valeurs (cf. partie 2.1). Enfin les stations de La Possonnière et de Montjean-sur-Loire étant situées bien après les limites de la marée dynamique, celles-ci ne sont pas répertoriées dans la base de données Quadrige d'Ifremer. De ce fait, pour permettre leur intégration dans le programme R, un code identifiant leur a été attribué en respectant la nomenclature de Quadrige 2 (tableau 14).

Tableau 14 : Synthèse des codes de référence Ifremer pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire

Nom de la station	Code Ifremer
La Possonnière	001 – G – 001
Montjean	001 – G – 002
Sainte-Luce-sur-Loire	070 – P – 023
Nantes / Indre	070 – P – 022
Cordemais	070 – P – 021
Saint-Nazaire / Mindin	070 – P – 020

Expertise a priori et a posteriori - L'analyse *a priori* des premiers résultats du DLM doit permettre de reprendre les données de base, suite à une analyse préliminaire dans le but d'obtenir des séries les plus précises possibles. L'objectif est donc, de faire la distinction entre les données exceptionnelles et aberrantes, ainsi que sur les changements de niveaux et de variance qui peuvent être observés sur des chroniques relativement longues, et qui

sont mis en exergue par le traitement préliminaire du modèle. L'exécution des programmes entraîne la création d'un ensemble de fichiers, dont trois sont principalement intéressants pour la compréhension des résultats préliminaires :

- « base » : les résultats bruts ;
- « changes » : les résultats avec intervention sur les changements de niveaux et de variance identifiés par le DLM ;
- « new changes » : les résultats avec intervention sur les changements de niveaux, de variance et des « outliers » identifiés par le DLM

Les propositions de changement de niveaux et de variances faites par le modèle concernent les données qui semblent avoir un impact fort dans les variations de la tendance et de la moyenne sur le long terme. Il en est de même pour les « outliers » (littéralement : données considérées comme étant « en dehors »), qui sont mises en exergue par le modèle à cause de leur caractère exceptionnel par rapport au flux de données entrant. En pratique, ces dernières peuvent potentiellement être des données exceptionnelles (conditions climatologique extrêmes, phénomène écologique exceptionnel...) ou des données fausses (erreur de saisie, de manipulation...).

L'objectif de cette étape est donc de confirmer ou d'infirmer les propositions de changements faites par le modèle en fonction des données brutes (changement de technique ou de protocole d'analyse au cours du temps, producteurs de données différents...). De plus, quand des changements dits « environnementaux » sont connus (changement de laboratoire d'analyse ou phénomène climatologique exceptionnel connu par exemple), cette étape permet d'introduire manuellement des changements de niveaux et/ou de variances ainsi que des outliers. Cette intervention se fait sur les fichiers CSV produits par le modèle et repose sur un modèle binaire :

- « vide » : le modèle n'a détecté aucun changements ;
- 1 : le modèle a détecté un changement et le « propose » comme changements de niveau/variance ou comme outliers

Si le changement proposé par le modèle est validé par l'utilisateur, le chiffre 1 est laissé dans la case correspondante ; à l'inverse si le changement proposé est considéré comme invalide par l'utilisateur, le chiffre est supprimé laissant le champ vide.

Ces analyses préliminaires se font également à l'aide d'un ensemble de représentations graphiques extraites du modèle DLM (« base », « change », « new change ») et peuvent être réalisées plusieurs fois de suite, et ce jusqu'à l'obtention d'une modélisation satisfaisante.

Dans le cas des données en Loire, deux analyses *a priori* ont été réalisées.

Première analyse (22/06/2015) - Globalement, les modifications faites lors de cette première phase d'analyse a consisté en un recalage des séries temporelles (recalage des limites temporelles ou bornes, afin de pallier l'absence de données de certaines chroniques) et une redéfinition des seuils min/max. Elle a également permis de s'interroger sur la légitimité d'utilisation de certains paramètres dans la modélisation. L'ensemble des modifications apportées au cours de cette première analyse sont brièvement décrites ici :

- **Débit** : Le seuil initial (valeur maximale introduite arbitrairement dans le modèle pour en définir les limites) fixé à 1000 fut jugé bien trop bas au regard des débits de crue pouvant atteindre les 6000 m³/s en Loire. Une redéfinition du seuil maximal à 10 000 a donc été proposée pour rationaliser l'analyse ;
- **Chlorophylle a** : Révision des « bornes » (limite temporelle) ;
- **Phéopigments** : Paramètre supprimé de l'analyse. Non utilisé par Ifremer dans le cadre de cette étude, les concentrations en phéopigments n'existent généralement que pour la période estivale et printanière et ne permet pas une analyse annuelle ;
- **Nitrates / Nitrites** : Révision des « bornes » et suppression des données fournies par Quadriga qui correspondent à des prélèvements effectués à pleine mer. Proposition d'un seuil minimal à 0,005 pour la station de Cordemais ;
- **Ammonium** : Paramètre difficile à suivre du fait de ces faibles concentrations dans le milieu. Révision des « bornes » et suppression des données extraites de Quadriga ;

- **Silicate**: Les fréquences obtenues sont trop irrégulières (au maximum, seulement 12 années consécutives pour MJ, moins de 6 pour toutes les autres) dans le temps avec la nécessité de réviser les « bornes ». L'éventualité de supprimer le paramètre est émise et est fonction des résultats du modèle ;
- **Phosphate** : Révision des « bornes ».

Face à ces résultats, le paramètre DIN est ajouté et s'apparente à la possibilité de suppression des analyses des nitrites et de l'ammonium, dont les faibles concentrations engendrent des difficultés d'intégration dans le programme R.

Deuxième analyse (16/07/2015 et 23/07/2015)- Après réception des résultats de la première analyse, une deuxième expertise *a priori* a été réalisée. Cette dernière s'intéresse principalement aux changements de niveaux et aux outliers, qui ont été proposés par le modèle. Comme précédemment, l'ensemble des modifications apportées sont brièvement décrites ci-dessous. Un tableau de synthèse et une description plus précise des interventions faites sur les changements de niveaux et les outliers sont en annexe (annexe 8 et 9).

- **Débit** : Pas de modification, mais le nombre de données trop important engendre des difficultés de traitement par le modèle ;
- **Chlorophylle a** : Ajustement sur 19 outliers et 10 changements de niveau ;
- **DIN** : Ajustement sur 8 outliers et 6 changements de niveau ;
- **Nitrates** : Ajustement de 18 outliers et de 6 changements de niveau ;
- **Nitrites** : Ajustement de 20 outliers et 7 changements de niveau ;
- **Ammonium** : Ajustement de 5 outliers et de 1 changement de niveau ;
- **Silicates** : Suppression de toutes les stations en dehors de Montjean-sur-Loire du fait d'un manque de données. Ajustement d'un outlier et d'un changement de niveau ;
- **Phosphates** : Ajustement de 5 outliers et d'un changement de niveau.

Après vérification, les outliers proposés par le modèle ont tous été validés. Les autres outliers ont été identifiés à l'aide du graphique des erreurs standardisées fournies par le modèle (annexe 10) et sont présentés dans un fichier CSV (figure 27).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Lieu.de.surv	Lieu.de.surv	Prélèvem	Résultat...Cc	Passage...Da	Résultat...V	Median	ChgNiveau	ChgVariance	Outlier	Libellé.de.I.	Prélèvem	Echantillon...	Echantillon...	Résultat...Li
2	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	09/02/1993	0.366432133	FALSE								NonRenseigi
3	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	08/06/1993	0.101257597	FALSE								NonRenseigi
4	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	19/10/1993	0.182003272	FALSE								NonRenseigi
5	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	17/11/1993	0.232896992	FALSE								NonRenseigi
6	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	15/02/1994	0.349206015	FALSE								NonRenseigi
7	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	15/03/1994	0.276458625	FALSE								NonRenseigi
8	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	10/05/1994	0.182395200	FALSE								NonRenseigi
9	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	12/07/1994	0.080147265	FALSE								NonRenseigi
10	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	09/08/1994	0.061196820	FALSE								NonRenseigi
11	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	05/09/1994	0.090459716	FALSE								NonRenseigi
12	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	11/10/1994	0.159489636	FALSE								NonRenseigi
13	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	08/11/1994	0.193360604	FALSE								NonRenseigi
14	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	11/01/1995	0.258528907	FALSE								NonRenseigi
15	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	02/02/1995	0.196353436	FALSE								NonRenseigi
16	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	08/03/1995	0.233495402	FALSE								NonRenseigi
17	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	05/04/1995	0.270600748	FALSE								NonRenseigi
18	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	04/05/1995	0.210708274	FALSE								NonRenseigi
19	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	13/06/1995	0.196573165	FALSE								NonRenseigi
20	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	12/07/1995	0.102671030	FALSE								NonRenseigi
21	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	10/08/1995	0.071322269	FALSE								NonRenseigi
22	Montjean	070 - G - 002	SurfTo5m	NID	14/09/1995	0.087735702	FALSE								NonRenseigi

Figure 27 : Extrait du fichier CSV de la station de Montjean-sur-Loire

Afin de juger de leur pertinence et de savoir si ces valeurs devaient ou non être considérées comme des données exceptionnelles (outliers), celles-ci ont toutes été comparées à la médiane mensuelle qui leur était associée.

Exemple : Un outlier est identifié sur le graphique des erreurs standardisés le 06/11/1988 pour une valeur de 289 pour le paramètre « chlorophylle a ». La comparaison de cet outlier sera donc faite par rapport à la médiane de toutes les valeurs des mois de mai de 1970 à 2014 de ce paramètre. Si la différence entre les deux valeurs est significative (plus de 50 %), l'outlier identifié sera considéré comme tel. En revanche, si la différence n'est pas significative l'outlier sera invalidé et considéré comme une valeur « classique ». Dans cet exemple, la médiane est MEDIANE[novembre] = 36, l'outlier identifié graphiquement est donc défini comme tel dans le fichier *a posteriori*.

L'analyse des changements de niveau proposés par le modèle a été menée par comparaison des fichiers CSV fournis par le modèle avec les métadonnées. Pour chaque changement de niveau proposé, une recherche dans les métadonnées mises à disposition par les producteurs de données a été réalisée afin de valider ou non les propositions de changements. Quand les propositions fournies par le programme avaient une justification connue (changement de laboratoire ou de méthode de prélèvement...), les changements de niveau proposés furent conservés. A l'inverse, les propositions non justifiables furent supprimées du fichier *a posteriori* (annexe 8 et 9).

Visualisation et interprétation graphique - Les résultats des expertises *a posteriori* sont observables dans le fichier « final » fourni par le programme et sont synthétisés en annexe (annexe 10).

b. Résultats

L'ensemble des résultats présentés ici, sont visibles en annexes (annexe 10).

⚠ Attention, les résultats présentés dans cette partie ne sont pas définitifs car le modèle DLM utilisé par Ifremer est encore en cours de finalisation. Ceux-ci reflètent des choix méthodologiques, présentés précédemment, et n'engagent que la responsabilité de l'auteur. L'étude sur la Loire est conduite parallèlement à l'étude menée sur la Vilaine, et les résultats produits permettent essentiellement de tester le modèle. L'absence de résultats pour certaines stations résulte d'un « bug » du modèle sous logiciel R, qui n'a pas abouti à la production d'un fichier « final ».

Les éléments nutritifs – Les résultats présentés ici sont relatifs aux paramètres constitutifs des cycles des éléments nutritifs en lien avec l'eutrophisation que sont : Le DIN, l'ammonium, les phosphates, le phosphore total et les silicates.

DIN et ammonium : La tendance générale observée est à l'augmentation des concentrations en DIN depuis le début des années 1990 à l'exception de SN, dont il n'est pas vraiment possible de dégager une tendance, et de CO dont les teneurs en DIN augmentent jusqu'à un maximal en 1982 avant de diminuer progressivement jusque dans les années 1990. Pour l'ensemble des stations, les concentrations saisonnières ont tendance à être maximales en hiver et minimales en été.

Les résultats obtenus pour l'ammonium sont à nuancer du fait de la largeur de l'enveloppe de confiance qui encadre les résultats (plus l'enveloppe de confiance est large (partie grisée sur la courbe de tendance visible sur les résultats), plus les résultats présentés s'éloignent des valeurs réelles). En dehors de CO, dont les concentrations en ammonium augmentent depuis les années 2000, la tendance pour les autres stations est à la diminution : début des années 1990 pour MJ, NA et SL et fin des années 90 pour PO et SN. En dehors des stations SL et NA, les variations saisonnières d'ammonium sont identiques à celles du DIN, maximales en hiver et minimales en été.

Phosphore total et phosphates : L'évolution des concentrations en phosphore total observée pour les 6 stations se traduit par une stabilité des concentrations en phosphore total à la fin des années 1990 /début des années 2000 en fonction des stations, suivie d'une diminution progressive. Les maximums de concentrations annuelles sont obtenus en hiver à l'exception des stations CO et NA (maximum en été, minimum en hiver) pour des minimums obtenus en période estivale. Après une stabilisation des concentrations en phosphates jusqu'au début des années 2000 pour PO et NA, la tendance générale de toutes les stations d'étude est à la diminution. Les maximums de concentrations annuelles sont obtenus lors de la période hivernale, alors que les minimums sont variables en fonction des stations : été pour PO, MJ, SL et SN et printemps pour SL (2004-2005), NA et CO.

Silicates : La tendance observée est à l'augmentation pour la seule station MJ qui présente suffisamment de mesures pour être pleinement exploitées. Les maximums saisonniers en silicates sont obtenus en période hivernale tandis que les minimums sont obtenus en période estivale (MJ, SL, NA) ou printanière (MJ en 2002 et 2005).

Le phytoplancton – L'évolution des teneurs en chlorophylle *a* pour la totalité des stations étudiées est à la baisse. Pour la station CO, elle semble atteindre un pallier à partir de la fin des années 1990. Les concentrations saisonnières présentent des valeurs minimales en hiver et maximales en période estivale et printanière. Un décalage saisonnier des maximums est cependant observé dans le temps (période estivale en orange, printanière en vert, absence de données en gris) (figure 28):

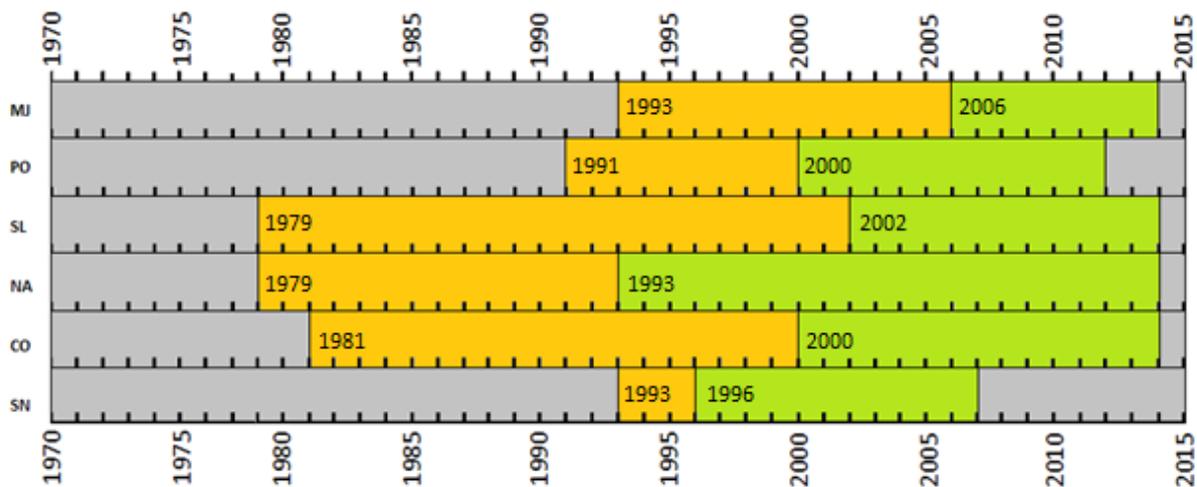


Figure 28 : Schéma présentant le décalage saisonnier des maximums de concentration en chlorophylle *a* observé dans le temps (Période estivale en orange et printanière en vert ; absence de données en gris)

Paramètre abiotique – Le débit est le seul paramètre abiotique étudié dans cette analyse et les résultats présentés ici sont issus des travaux menés par Ifremer sur les débits en Loire⁹. Si une légère diminution des débits au cours du temps est constatée, aucune tendance d'évolution ne peut être dégagée des résultats obtenus. Les saisons sont en revanche très marquées, avec des débits maximums atteints en période hivernale et des minimums en période estivale.

c. Discussion

Comme pour la première méthode d'analyse des données, les résultats présentés ci-dessus sont discutés dans cette partie et l'analyse critique de la méthode est exposée dans la partie suivante.

DIN et ammonium : Comme le montrent les résultats précédemment décrits, la tendance d'évolution des concentrations en DIN est à l'augmentation sur ces 40 dernières années pour toutes les stations étudiées à l'exception de CO, dont la diminution peut éventuellement s'expliquer par le fait que cette station est située dans la zone où le bouchon vaseux est présent une grande partie de l'année. L'hypothèse d'une diminution des concentrations en DIN liée à des processus complexes d'échange et de stockage entre la masse turbide en suspension (préférentiellement située à CO au cours de l'année) et les sédiments déposés peut, au vu de ces résultats, être émise :

- *Diffusion des nitrates dans les sédiments* : Les nitrates formés en zone dite « aérobie » par minéralisation de la matière organique dans les eaux profondes en contacts avec les sédiments, peuvent diffuser à travers les sédiments où ils seront dénitrifiés par l'action de bactéries anaérobies dénitrifiantes. Cette diffusion peut être à l'origine d'un « stockage », qui va générer une diminution locale des concentrations en nitrates et donc en DIN (figure 29)
- *Augmentation du processus de dénitrification* : En période de « mortes eaux », le bouchon vaseux aura tendance à décanter avec une colonne d'eau qui aura tendance à devenir moins turbide. Selon une étude menée dans l'estuaire de la Seine, le processus de dénitrification est limité en milieu très turbide (entre 10 et 20 mgN/L/h d'azote dénitrifié) (Nemery, 2007). La décantation du bouchon vaseux peut donc favoriser le

⁹ Les valeurs de débits en Loire sont quotidiennes et génèrent donc un grand nombre de valeurs qui sont trop importantes pour être traitées par le modèle. Une moyenne sur 15 jours a donc été calculée dans le but d'obtenir un maximum de 2 valeurs mensuelles sur la période 1970-2014. Les résultats de ce choix méthodologique sont présentés ici mais ne sont pas issus des travaux de l'auteur.

processus de dénitrification et expliquer la tendance à la diminution observée. Associés à cela, la diminution de la turbidité, peut favoriser une pénétration de la lumière dans l'eau et permettre un meilleur développement phytoplanctonique pouvant générer une diminution des concentrations en nitrates par consommation. Les DIN étant majoritairement représentés par les teneurs en nitrates, l'action de diminution portée sur les nitrates peut se répercuter sur les concentrations en DIN.

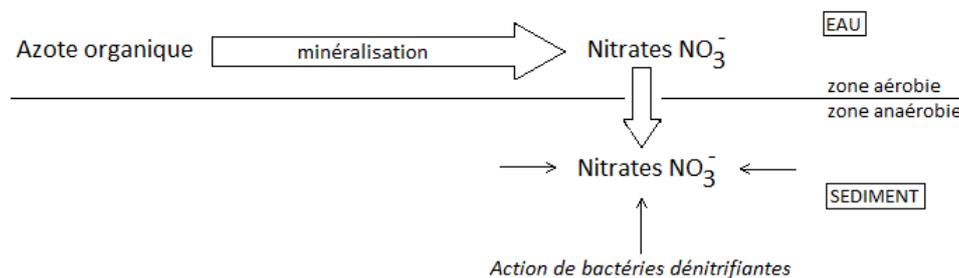


Figure 29 : Schéma de la diffusion des nitrates à l'interface eau/sédiment

Les maximums de concentrations observés en période hivernale peuvent s'expliquer par une pluviométrie plus élevée en cette saison avec un lessivage des sols du bassin versant qui favorisera l'apport de matière azotée. A l'inverse, les minimums observés en période estivale peuvent se justifier par une consommation par le phytoplancton qui, en période estivale est en période productive.

La tendance à la diminution des ammoniums en Loire, de la Maine à la mer peut s'expliquer par les premières vagues de mesures européennes et nationales dans les années 1990 et leurs accentuations dans les années 2000, qui ont pu avoir un impact positif sur l'évolution des concentrations en ammoniums. En revanche les observations saisonnières faite à SL et NA avec des maximums estivaux et minimum hivernaux est difficilement explicable. Néanmoins, SL est située sur la partie aval de la vallée maraîchère donc dans un secteur de forte production agricole et NA est située à l'aval des rejets des deux principales STEP de l'agglomération nantaise. Le poids des apports de la vallée maraîchère et des STEP seraient ainsi perceptible en période estivale, alors qu'il serait atténué en période hivernale grâce à une dilution supérieure avec l'augmentation des débits.

Phosphates : La tendance à la diminution des concentrations en phosphates dans le milieu peut se justifier de la même façon que pour les deux méthodes d'analyse précédentes c'est-à-dire par l'application des différentes mesures de restriction des phosphates. La stabilité des concentrations visible avant les années 2000 peut s'expliquer par le temps de latence qui peut s'observer entre la prise de décisions des mesures de restriction, leur application et des effets de ces mesures sur le milieu. Comme pour le DIN les maximums de concentrations en hiver peuvent être dus à un faible développement phytoplanctonique en cette période avec des phosphates qui ne sont pas consommés. Les minimums estivaux sont observés pour MJ, PO et SN qui sont les deux stations les plus amont et la station la plus aval. Pour MJ et PO, qui sont strictement fluviales ces minimums sont probablement le fait d'une consommation phytoplanctonique, alors que pour SN cela est probablement dû au phénomène de dilution par les eaux marines. Concernant les trois stations du bief fluvio-maritime (SL, NA et CO) les minimums de concentrations sont atteints en période printanière.

Les concentrations maximales en phosphates à la station SL alternent entre saison estivale et printanière. Cette particularité laisse supposer qu'en période printanière et qu'en faible condition de débit, SL est soumise aux mêmes conditions que NA et CO. Le bouchon vaseux étant en capacité de remonter jusqu'à SL en période de faible débit et de marée de « vives eaux » (cas des années 2004 – 2005), les faibles concentrations en phosphore total en période printanière à cette station peut s'expliquer par des processus de stockage ou d'échange de phosphate au sein de la masse turbide ; déjà évoqués lors de l'analyse des résultats de la mise à jour des suivis. Concernant le phosphore total l'évolution dans le temps est la même que pour les phosphates et tend à diminuer.

Silicates : Si le modèle sous R fournit des résultats « final » pour MJ, les valeurs étant peu nombreuses, les résultats sont, de ce fait, peu exploitables pour les autres stations. L'évolution des concentrations en silicates au cours du temps suggère une légère augmentation à la station de MJ et est difficilement explicable, les silicates étant les seuls

nutriments à ne pas être d'origine anthropique. L'hypothèse d'un changement des communautés phytoplanctoniques au cours du temps, avec une diminution des communautés de diatomées peut éventuellement expliquer cette tendance. Les concentrations les plus élevées sont obtenues en hiver et peuvent être liées au phénomène de lessivage des roches et des sols du bassin versant, qui est plus intense en période hivernale. Les faibles concentrations estivales s'expliquent, elles, par une consommation en période productive par le phytoplancton et en particulier par les diatomées.

Chlorophylle a : Le décalage saisonnier observé pour la chlorophylle *a* dans les résultats (figure 28) peut être dû à une modification des communautés phytoplanctoniques en Loire au cours de ces dernières années. Comme cité dans la présentation du territoire et dans la synthèse bibliographique (cf. partie 1 et 2), les évolutions qui ont eu lieu sur le lit de Loire et son bassin versant (aménagement hydrauliques, changement d'occupation des sols etc.) ont impacté les milieux. Cet impact s'est répercuté sur les communautés d'espèces phytoplanctoniques et a pu se manifester par des changements communautaires. Les espèces qui se développaient en période estivale dans les années 1980 - 2000 ont très probablement dû diminuer au profit d'autres espèces qui, elles, ont une période productive au printemps.

Autre hypothèse possible, une évolution des conditions climatiques. En effet, l'élévation de la température et la diminution des débits au cours de ces 40 ans dernières années ont très bien pu être à l'origine d'un décalage dans le temps des « optimums » de développement des espèces : les conditions qui étaient favorables en été pour le développement phytoplanctonique se seraient décalées au printemps.

d. Limites

Le modèle DLM utilisé pour la réalisation d'une analyse temporelle complémentaire à la méthode des anomalies, présente un potentiel d'utilisation non négligeable avec des avantages et des inconvénients.

Le premier avantage est que ce modèle répond aux attentes des analyses de série sur le long et permet de dégager une saisonnalité ainsi qu'une tendance sur le long terme. Celui-ci met également en avant des possibles ruptures de pentes qui témoignent d'une variabilité exceptionnelle des données brutes. Ces ruptures permettent alors de se questionner sur la validité des données ou sur les méthodes d'analyse et de prélèvements employées. Le modèle DLM met également en exergue des événements exceptionnels qui ont lieu sur une chronique. L'identification de ces événements peut aboutir à une réflexion qui visera à comprendre ce qui s'est passé à cet instant précis et savoir s'il relève réellement de l'exceptionnel ou s'il s'agit d'une valeur aberrante. Les fiches de synthèse « final » produites par le modèle permettent une visualisation rapide des résultats, des tendances et de la saisonnalité.

Cependant, ce modèle est complexe et n'est manié que par son concepteur. Exigent en termes de formatage des données, l'utilisation du DLM nécessite une remise en forme des données pour leur intégration qui est d'autant plus chronophage qu'il y a de stations et de paramètres (pour rappel 6 stations et 10 paramètres initiaux). Par ailleurs, le modèle en lui-même, est limité quant à la qualité et la quantité de données intégrées. Globalement, le DLM est conçu pour traiter 2 valeurs par mois en moyenne, les valeurs quotidiennes générant un « bug ». Ces « bugs » seront également observés pour une trop faible quantité de données comme ce fut le cas des silicates à Saint-Nazaire. Les paramètres présentant des concentrations faibles comme les nitrites ou les ammoniums, sont également difficilement traités par le DLM, avec des interventions sur les fichiers de données qui sont relativement longues et qui peuvent ne pas aboutir à des résultats facilement exploitables.

De plus, si le DLM a pour objectif de s'adapter à la saisonnalité des données, celui-ci n'est pas adapté à la « réalité du terrain » avec des fréquences d'acquisition de la donnée qui sont variables aux échelles annuelle et inter-annuelle, ainsi que selon les stations.

Enfin, la gestion des changements de niveau, de variables et des « outliers » qui sont proposés par le DLM sont fonction de l'utilisateur et ne dépendent pas d'une méthodologie pré-définie. Les changements effectués au cours des étapes d'analyse *a priori* et *a posteriori* reflètent les décisions qui ont été prises par l'auteur pour une étude

spécifique et à un instant précis. Les résultats présentés dans cette étude, reflètent donc les choix qui ont été faits pour répondre à la problématique de l'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer, et décisions qui ont été prises par l'auteur.

3.3.3. CONCLUSION

Les principaux résultats fournis par ces deux méthodes d'analyse de séries temporelles, confortent les tendances d'évolution mises en avant par la mise à jour des fiches de synthèse du GIP Loire Estuaire. En effet, sur le domaine d'étude du GIP LE, les tendances d'évolution des concentrations en nutriments et en phytoplancton sur ces 40 dernières années sont :

- Augmentation des concentrations en azote inorganique dissous – « DIN » ($\mu\text{mol/L}$) ;
- Diminution des concentrations en phosphates et en phosphore total (mg/L) ;
- Diminution des teneurs en *chlorophylle a* et en phéopigments ($\mu\text{g/L}$).

Les variations des conditions hydro-climatiques sur la période 1970-2014 mises en exergue par cette étude sont corrélées par plusieurs études faites sur la Loire (le fleuve) relatives à l'impact du changement climatique sur les milieux (*étude de Moatar et Gailhard en 2006 par exemple*). Si la tendance à l'augmentation des températures en Loire s'observe sur tout le linéaire de la Loire, l'évolution décroissante des débits est à nuancer. En effet si l'on constate une diminution des débits moyens sur la période 1970 – 2014, un suivi des débits à plus grande échelle (1863 – 2014) ne permet pas de dégager une tendance significative et témoigne d'une possible cyclicité des débits dans le temps (environ 40 ans) avec une période 1970-2014 qui s'inscrirait dans une phase descendante.

L'utilisation de deux méthodes d'analyse différentes a permis d'émettre un certain nombre d'hypothèses sur l'évolution des concentrations en nutriments/phytoplancton en Loire, mais également sur la multitude d'interactions qui peut exister sur les trois principaux secteurs qui définissent le territoire d'étude du GIP LE à savoir, l'estuaire externe (aval de Saint-Nazaire), le bief fluvio-maritime (de Saint-Nazaire à Anetz) et le domaine fluvial (de Anetz aux Pont-de-Cé).

Enfin, l'utilisation de deux méthodes d'analyse différentes reste intéressante car complémentaires. De plus la multiplication des méthodes d'analyse permet généralement d'aboutir des conclusions qui s'approchent au plus près de la réalité.

PARTIE 4 - INVENTAIRE DE L'EUTROPHISATION EN LOIRE

4.1. Les grilles de qualité et les seuils existants

Il existe plusieurs principes et grilles d'évaluation pour estimer la qualité des eaux. La première grille d'évaluation date de 1971 connue sous le nom de « grille 71 », dont les méthodes de calcul, les paramètres suivis et les classes définissant la qualité des eaux ont depuis, beaucoup évolué. En fonction de la typologie de la masse d'eau, l'évaluation de la qualité de l'eau et des seuils des différentes classes de qualité, va varier. Dans le cas de la Loire, de la Maine à la mer, deux typologies de masses d'eaux différentes doivent être prises en compte :

- masse d'eau douce ;
- masse d'eau de transition.

4.1.1. LES MASSES D'EAU DOUCE

La première évaluation masse d'eau « cours d'eau » fait référence à la « grille 71 » qui repose sur une soixantaine de paramètres. Les objectifs de cette grille étaient de faire une évaluation d'une masse d'eau en fonction de son aptitude à certains usages (potabilisation de l'eau, qualité sanitaire, etc) (www.eau.anjou.fr).

Aujourd'hui, la qualité des masses d'eau peut être évaluée selon deux systèmes :

- Système d'évaluation de la qualité des cours d'eau, SEQ-eau ;
- Système d'évaluation de l'état des eaux, SEEE (DCE).

a. Le SEQ-eau

Sur l'initiative des Agences de l'eau et du Ministère de l'environnement, une nouvelle grille d'évaluation de la qualité de l'eau est développée en 1992 et repose sur trois volets :

- le volet « eau » qui permet d'évaluer la qualité physico-chimique et l'aptitude de la masse d'eau aux « fonctions naturelles des milieux aquatiques et de leur usage » ;
- le volet « biologie » qui va évaluer la masse d'eau en fonction de l'état de la biocénose par l'intermédiaire de paramètres biologiques ;
- et un volet « milieu physique » qui repose sur l'évaluation du niveau d'artificialisation du cours d'eau.

La qualité globale de la masse d'eau étant définie en fonction de l'état obtenu pour chacun de ces trois volets (MEDD, 2003). Dans le cadre de la présente étude, l'intérêt est porté sur les classes de qualité et les indices d'aptitude biologique qui sont relatifs à nos paramètres d'intérêt (tableau 15) :

Tableau 15 : Synthèse des classes de qualité des paramètres d'intérêt relatif au volet "biologie" du SEQ-eau (d'après le SEQ-eau)

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
Oxygène dissous (mg/L)	8	6	4	3	
Ammonium (mg/L)	0,5	1,5	4	8	
Nitrites (mg/L)	0,03	0,3	0,5	1	
Nitrates (mg/L)	2				
Phosphates (mg/L)	0,1	0,5	1	2	
Phosphore total (mg/L)	0,05	0,2	0,5	1	
Chlorophylle a / Phéopigment (µg/L)	10	60	120	240	
Température	20	21,5	25	28	

b. Le SEEE

C'est par mise en application de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE/2000/60) que le SEEE a été mis en place, afin d'harmoniser les pratiques d'évaluation de la qualité des cours d'eau pour l'ensemble des pays de l'Union européenne. Contrairement au SEQ-eau, le SEEE ne s'intéresse pas aux usages anthropiques de l'eau et s'intéresse à l'état global de la masse d'eau en fonction des états chimique et écologique :

- l'état chimique est déterminé à partir des normes de qualité environnementale (NQE) d'un groupement de 41 substances potentiellement dangereuses. Il est divisé en deux classes d'états : bon et mauvais ;
- l'état écologique est fonction de deux autres états : physico-chimique et biologique qui reposent tous deux sur différents éléments de qualité. Ces états sont déclinés en 5 classes : très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais.

Pour cette étude, l'intérêt est porté sur les éléments de qualité physico-chimiques (tableau 16) :

Tableau 16 : Synthèse des classes d'état des paramètres d'intérêt relatif à l'état de la qualité biologique (d'après la DCE 2000/60)

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
Oxygène dissous (mg/L)	8	6	4	3	
Ammonium (mg/L)	0,1	0,5	2	5	
Nitrites (mg/L)	0,1	0,3			
Nitrates (mg/L)	10	50			
Phosphates (mg/L)	0,1	0,5	1	2	
Phosphore total (mg/L)	0,05	0,2	0,5	1	
Température	20	21,5	25	28	

Concernant le paramètre « chlorophylle *a* », celui-ci n'est pas étudié au titre de la DCE en dehors de l'évaluation de l'état de qualité des plans d'eau. L'état biologique repose sur des paramètres différents, que sont l'IBD (Indice Biologique Diatomées), les macro-invertébrés benthiques et les poissons (JOCE, 2000).

4.1.2. LES MASSES D'EAU DE TRANSITION

Tout comme les masses d'eau « cours d'eau », deux systèmes d'évaluation des masses d'eau « de transition » existent à l'échelle nationale :

- Système d'évaluation de la qualité des eaux littorales, SEQ-Littoral
- Système d'évaluation de l'état des eaux, SEEE (DCE)

a. Le SEQ-littoral

Construit à l'image du SEQ-eau de 1992, le SEQ-littoral n'a cependant pas été mis en œuvre sur les masses d'eau de transition du fait de la mise en application de la DCE. Comme pour le SEQ-eau, l'intérêt se porte sur les paramètres du volet « eau et potentialité biologique » (tableau 17):

Tableau 17 : Synthèse des classes de qualité des paramètres d'intérêt relatif au volet "biologie" du SEQ-littoral (d'après le SEQ-littoral)

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
Oxygène dissous (mg/L)	6	5	2	1	
Chlorophylle <i>a</i> (µg/L)	10	20	40	50	

Cependant les paramètres évalués, sont très différents de ceux étudiés en eau douce et la correspondance n'est pas possible pour la totalité des paramètres étudiés dans cette étude. En effet, l'azote est étudié dans le SEQ-littoral sous forme d'ammoniaque NH₃⁺. Les seuils appliqués au teneurs en chlorophylle *a* reposent sur la grille établie par le NOAA (« National Oceanic and Atmospheric Administration ») en 1999 (tableau 18) (MEDD, 2002):

Tableau 18 : Définition des niveaux trophiques d'une masse d'eau en fonction des concentrations en chlorophylle *a* selon le NOAA " National Oceanic and Atmospheric Administration" (source : SEQ-littoral)

Chlorophylle <i>a</i> (µg/L)	Niveau trophique
> 40	Hyper-eutrophe
20 – 40	Niveau élevé – Eutrophe
10 -20	Niveau moyen – Mésotrophe
< 10	Niveau faible - Oligotrophe

b. Le SEEE

Au titre de la DCE, la typologie des masses d'eau est fonction du niveau d'artificialisation. Dans l'estuaire de la Loire, les aménagements anthropiques sont nombreux, et celui-ci a donc été classé comme masse d'eau fortement modifiée (MEFM). Si le fondement de la définition de l'état global reste le même entre les masses d'eau naturelles et les MEFM, la notion d'état global est remplacé par la notion de « potentiel ». L'évaluation des MEFM sera donc fonction du potentiel écologique et chimique de la masse d'eau.

Les éléments de physico-chimie qui sont intéressants dans le cadre de cette étude, sont les mêmes que ceux des masses d'eau naturelles, le paramètre de la chlorophylle *a* n'étant pas évalué.

c. Comparaison

En dehors de la chlorophylle *a* qui n'est pas évaluée dans le SEEE, les valeurs seuils attribuées pour définir les différentes classes de qualité sont identiques à l'exception de trois paramètres (tableau 19) :

Tableau 19 : Comparaison des valeurs seuils pour les éléments azotés entre les SEQ-eau et le SEEE de la DCE

		Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
Ammonium (mg/L)	SEQ-eau	0,5	1,5	4	8	
	SEEE	0,1	0,5	2	5	
Nitrites (mg/L)	SEQ-eau	0,03	0,3	0,5	1	
	SEEE	0,1	0,3			
Nitrates (mg/L)	SEQ-eau	2				
	SEEE	10	50			

Du fait de son utilisation à l'échelle européenne et de son application récente, les valeurs seuils du SEEE seront prioritairement utilisées dans cette étude. Les seuils du SEQ-eau/SEQ-littoral seront pris en compte pour les paramètres non utilisés dans l'évaluation de la qualité des eaux du SEEE, comme c'est le cas de la chlorophylle *a*.

4.2. Recensement et caractérisation des événements d'eutrophisation en Loire

4.2.1. COMPARAISON DES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES ET DES DONNEES BRUTES

Grâce à la synthèse bibliographique, un certain nombre d'événements d'eutrophisation attesté ou supposé a été identifié. Afin de compléter cet inventaire, une étude comparative des données issues de la synthèse bibliographique et des données issues des réseaux de surveillance de la qualité de l'eau compilées dans le cadre du stage, a été menée et est synthétisée dans le tableau ci-après (tableau 20):

Tableau 20 : Tableau de comparaison entre les événements recensés dans la bibliographie et les données brutes synthétisées

Année	Données issues de la synthèse bibliographique				Données brutes		
	Localisation	Période d'observation	Chlo α [$\mu\text{g/L}$]	Observations [mg/L]	Date	Chlo α [$\mu\text{g/L}$]	Observations [mg/L]
1979	Sainte-Luce-sur-Loire	Juillet	150	NO ₃ [5] ; PO ₄ ³⁻ [< 0] ; SiO ₃ [6]	02/07	149	NO ₃ [4,69] ; PO ₄ ³⁻ [< 0,05] ; SiO ₃ [6,8]
		Octobre	140	NO ₃ [5] ; PO ₄ ³⁻ [< 0] ; SiO ₃ [7]	Pas de correspondance		
1980	Sainte-Luce-sur-Loire	Juin	225	NO ₃ [5] ; PO ₄ ³⁻ [< 0] ; SiO ₃ [2]	03/06	230	NO ₃ [4,95] ; PO ₄ ³⁻ [< 0,05] ; SiO ₃ [2]
		Juillet	240		01/07	103	NO ₃ [5] ; PO ₄ ³⁻ [< 0,05] ; SiO ₃ [8,9]
		Septembre	150	NO ₃ [4] ; PO ₄ ³⁻ [< 0] ; SiO ₃ [2]	03/09	151	NO ₃ [0,99] ; PO ₄ ³⁻ [< 0,05] ; SiO ₃ [5,1]
1981	Sainte-Luce-sur-Loire	Mai	361	NO ₃ [12] ; PO ₄ ³⁻ [< 0] ; SiO ₃ [6]	Absence de données brutes		
		07/08/1981	350		05/08	89	NO ₃ [5,09] ; PO ₄ ³⁻ [0,29] ; SiO ₃ [7,3]
1982	La Possonnière	Octobre	100		Pas de correspondance		
		06/08/1982	220		05/08	178	NO ₃ [3,99] ; PO ₄ ³⁻ [0,19] ; SiO ₃ [4,9]
	Saint-Nazaire	Juin		Absence de données brutes			
	Sainte-Luce-sur-Loire	Juin	200		06/06	136	NO ₃ [3,99] ; PO ₄ ³⁻ [< 0,05] ; SiO ₃ [7,6]
Août		240		04/08	152	NO ₃ [1,99] ; PO ₄ ³⁻ [0,09] ; SiO ₃ [1,9]	
1983	Sainte-Luce-sur-Loire	Juillet	160		Absence de données brutes		
		Août	175		03/08	179	NO ₃ [6,9] ; PO ₄ ³⁻ [0,19] ; SiO ₃ [8,2]
1984	La Possonnière	Juillet	210		05/07	135	NO ₃ [2,69] ; PO ₄ ³⁻ [0,09] ; SiO ₃ [5,9]
	Sainte-Luce-sur-Loire		200		01/08	167	NO ₃ [0,59] ; PO ₄ ³⁻ [< 0,05] ; SiO ₃ [3,4]
	Saint-Nazaire		100		Absence de données brutes		
1985	La Possonnière	Juillet	200		04/07	127	NO ₃ [8,67] ; PO ₄ ³⁻ [0,19] ; SiO ₃ [8,1]
		Août	290		08/08	198	NO ₃ [7,39] ; PO ₄ ³⁻ [< 0,05] ; SiO ₃ [6,6]
	Sainte-Luce-sur-Loire	Eté	300		05/09	226	NO ₃ [11,9] ; PO ₄ ³⁻ [0,09] ; SiO ₃ [3,8]
	Saint-Nazaire	Eté	110		Absence de données brutes		
			215		08/09	214	NO ₃ [2,79] ; PO ₄ ³⁻ [0,29] ; SiO ₃ [1]
	Sainte-Luce-sur-Loire	10/1986	200		Absence de données brutes		
		Eté	245		04/06	243	NO ₃ [2,09] ; PO ₄ ³⁻ [0,19] ; SiO ₃ [4,2]
Octobre		250		01/10	93	NO ₃ [3,59] ; PO ₄ ³⁻ [0,09]	
	180						
1988	Sainte-Luce-sur-Loire	Eté	130		Absence de données brutes		
	Saint-Nazaire	Août		40.10 ⁶ cellules/L	Absence de données brutes		
1989	Ile beaulieu et Trentemoult	08/10/1989			05/10	170	NO ₃ [1,4]
1990	Saint-Nazaire	07-08/1990			Absence de données brutes		
2005	Saint-Nazaire	08/09/2005		Phytoplancton toxique	Pas de correspondance		
2009	Saint-Nazaire	06/2009			Pas de correspondance		
2011	Nantes	08/2011		Prolifération de cyanobactéries	26/09	66,6	NO ₃ [6,5]
	Saint-Nazaire	08/2011			Absence de données brutes		

Globalement, les phénomènes identifiés dans la synthèse bibliographique sont corroborés aux données synthétisées sur les réseaux de suivis. L'absence de correspondance entre certaines valeurs entre l'étude bibliographique et les données est due au possible décalage des dates de prélèvement avec les événements d'eutrophisation identifiés indépendamment. En effet, les données brutes sont issues des prélèvements faits en Loire par les réseaux de surveillance à une fréquence moyenne d'un prélèvement par mois. Ce n'est pas toujours le cas des valeurs issues des références bibliographiques, celles-ci pouvant provenir d'un suivi spécifiquement mis en place à plus ou moins long terme pour une étude particulière.

4.2.2. IDENTIFICATION DES EFFLORESCENCES ALGALES

Dans la littérature grise, un bloom phytoplanctonique est généralement considéré lorsque les concentrations en chlorophylle a excèdent les 100 $\mu\text{g/L}$ en eau douce. Cependant aux cours de ces dernières années, les exigences en termes de qualité de l'eau ont évolué avec des valeurs comprises entre 60 et 120 $\mu\text{g/L}$ pour la chlorophylle a définies dans le SEQ-eau. C'est donc cette limite qui sera retenue comme valeur seuil d'un phénomène d'eutrophisation dans cette analyse, à l'exception de Saint-Nazaire (> 40 $\mu\text{g/L}$ comme défini dans le SEQ-eau « littoral »).

Au total ce sont près de 407 événements locaux d'eutrophisation qui sont recensés en Loire, de la Maine à mer de 1976 à 2014 pour des concentrations en chlorophylle a variant de 60 à 289 $\mu\text{g/L}$ pour toutes les stations, à l'exception de Saint-Nazaire où les teneurs varient entre 40 et 58 $\mu\text{g/L}$. Cependant plusieurs événements peuvent être observés pour un même temps donné. Par exemple, les 2 blooms observés à Sainte-Luce-sur-Loire (230 $\mu\text{g/L}$) et Nantes (129 $\mu\text{g/L}$) le 03/06/1980 sont temporellement proches du bloom observé à Montjean (219 $\mu\text{g/L}$) le 05/06/1980. Trois blooms sont donc observés pour un même phénomène d'eutrophisation. En considérant ce paramètre temporel, les phénomènes d'eutrophisation sont identifiés sur des périodes de 3 semaines, correspondant à la durée de vie moyenne du phytoplancton (Fouquart, 2002) ; ces phénomènes seraient finalement au nombre de 154 entre 1976 et 2014 (1976, date des premières mesures de chlorophylle a existantes entre La Possonnière et Saint-Nazaire).

En se basant sur le seuil de chlorophylle a à 100 $\mu\text{g/L}$ indiqué dans la littérature grise, ce sont 105 événements locaux, pour 87 événements d'eutrophisation qui sont observés en Loire, de la Maine à la mer, entre 1976 et 2014. En se référant à ce seuil, aucun phénomène d'eutrophisation n'est recensé en Loire depuis 2009, témoignant d'un changement au cours du temps de l'appréhension des phénomènes d'eutrophisation par la société, avec des mesures de préservation de la qualité de l'eau qui sont devenues plus restrictives au cours du temps.

4.2.3. CARACTERISATION DES EFFLORESCENCES ALGALES

La caractérisation des événements précédemment identifiés permet de mettre en exergue les conditions du milieu en période de prolifération algale. Les résultats ont été synthétisés ci-après par classe de 60 $\mu\text{g/L}$ de chlorophylle a . Les concentrations de chaque paramètre sont représentées par la moyenne de l'ensemble des valeurs obtenues lors des blooms, auxquelles sont associées, pour rappel, les moyennes annuelles des concentrations.

Tableau 21 : Synthèse des valeurs moyennes des concentrations en nitrates, phosphates, silicates et oxygène dissous ainsi que de la température de l'eau par classe de 60 $\mu\text{g/L}$

Station	Chlorophylle a [$\mu\text{g/L}$]	Nitrates [mg/L]	Phosphates [mg/L]	Silicates [mg/L]	Oxygène dissous [mg/L]	Température de l'eau [°C]
La Possonnière	60 - 120	8,44	0,22	8,9	11,4	19,2
	120 - 180	6,2	0,18	6,4	11,7	18,5
	180 - 240	4,5	0,13	5,4	12,1	17,9
	> 240	7,8	0,09	5	11,3	13,5
<i>Moyenne annuelle des concentrations</i>		12,8	0,2	10	10,5	14,4
Montjean-sur-Loire	60 - 120	7	0,1	9,7	9,3	19,8
	120 - 180	4,3	0,08		11,5	19
	180 - 240					
	> 240					
<i>Moyenne annuelle des concentrations</i>		12,3	0,14	12,3	10,3	13,9
Sainte-Luce-sur-Loire	60 - 120	6,8	0,15	8,6	10,1	18,1
	120 - 180	5,4	0,15	5	11	18,3
	180 - 240	4,1	0,17	3,2	12,4	18,5
	> 240					
<i>Moyenne annuelle des concentrations</i>		10,8	0,19	0,16	10,3	13,8
Nantes (Indre)	60 - 120	8,1		9,1	9,1	17,7
	120 - 180	6,7	0,6	6,5	9,5	17,6
	180 - 240	4		3,6	10,1	19,1
	> 240					
<i>Moyenne annuelle des concentrations</i>		10,3	0,27	11,3	8,6	14,6
Cordemais	60 - 120	9,2	0,4	12,8	6,6	18
	120 - 180	5,9	0,22		11,3	18,9
	180 - 240					
	> 240					
<i>Moyenne annuelle des concentrations</i>		10	0,4	13,6	6,8	15,4

Pour les stations situées le plus en amont, les conclusions précédentes sont confirmées par le tableau ci-dessus :

- Observation d'une consommation des éléments nutritifs par le phytoplancton en période productive au regard de leurs moyennes annuelles des concentrations ;
- Concentrations en oxygène dissous élevée qui attestent d'une bonne oxygénation de la masse d'eau du fait de l'activité photosynthétique ;
- Un développement phytoplanctonique qui a lieu dans de bonnes conditions d'ensoleillement, qui en plus de fournir l'énergie lumineuse nécessaire à la photosynthèse, va « chauffer » la masse d'eau, comme en témoignent les températures élevées.

Associée aux seuils réglementaires de la qualité de l'eau, la corrélation entre les teneurs en chlorophylle *a* et les différents paramètres liés à l'eutrophisation peut être indicative pour déterminer une gamme de valeurs où un phénomène d'eutrophisation est potentiellement observable dans les eaux de la Loire (annexe 11).

En fonction des seuils existants et des résultats de l'eutrophisation observés sur ces 40 dernières années, une première approche des gammes de valeur où un phénomène d'eutrophisation peut, potentiellement être observé en Loire, peut être élaborée. Pour chaque paramètre, ces valeurs sont déterminées à partir des moyennes des concentrations par paramètres observées lors des blooms qui ont eu lieu en Loire, de la Maine à la mer, entre 1976 et 2014. Chacun d'eux étant ensuite comparé aux résultats des droites de corrélation réalisées entre la chlorophylle *a* et chaque paramètre, afin de les valider.

Les résultats de cette première approche d'établissement d'une gamme de valeurs où un phénomène d'eutrophisation est susceptible d'être observé en Loire, de la Maine à la mer, sont regroupés ci-après (tableau 22) :

Tableau 22 : Première approche des gammes proposée pour l'identification d'un phénomène d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer

	Nitrates [mg/L]	Phosphates [mg/L]	Silicates [mg/L]	Oxygène dissous [mg/L]	Température [°C]
Gamme proposée	[1 ; 9]	[0,05 ; 0,2]	[2 ; 10]	[5 ; 12]	[17 ; 20]

4.3. Synthèse et évolution de l'eutrophisation en Loire sur 1971-2014

Evolution du nombre de phénomènes d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer de 1976 à 2014

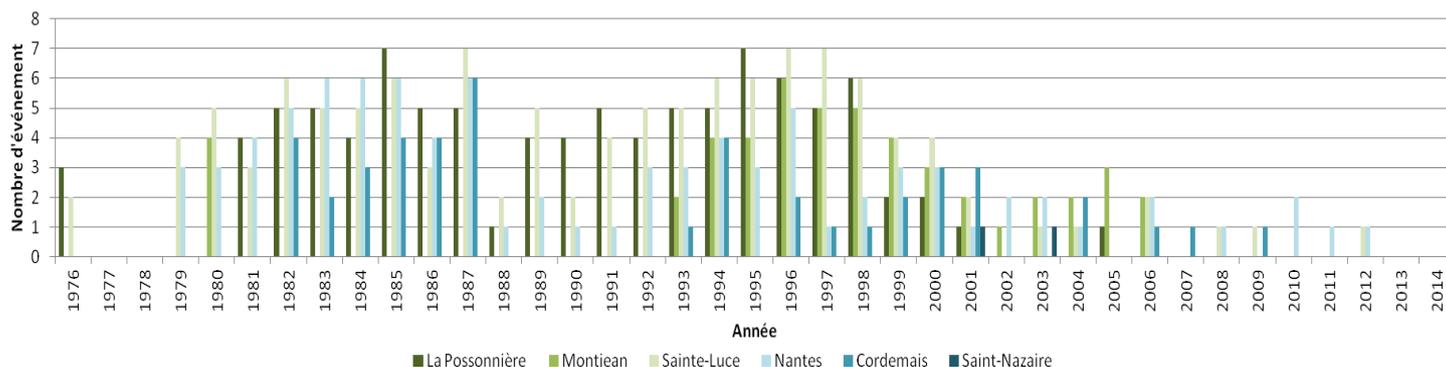


Figure 30 : Graphique de l'évolution du nombre de phénomènes d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer entre 1976 et 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

D'une manière générale, les phénomènes d'eutrophisation en Loire ont eu tendance à devenir de moins en moins nombreux au cours de ces dernières années (figure 30). L'application des moyens de lutte contre l'eutrophisation à travers des mesures restrictives réalisées sur les nutriments, associés à une probable évolution des communautés phytoplanctoniques en Loire, ont vraisemblablement contribué à limiter l'eutrophisation sur le secteur de la Maine à la mer. L'intensité des proliférations algales a également diminué sur la période 1976 - 2014, avec des concentrations en chlorophylle *a* qui ont nettement diminué au cours du temps, passant d'une eutrophisation moyenne de 184 µg/L de chlorophylle *a* en 1982, à 106 µg/L en 1997, avant de diminuer à 67 µg/L en 2012, à Sainte-Luce-sur-Loire (figure 31).

Evolution de la moyenne annuelle des blooms phytoplanctonique (>60µg/L) recensé à Sainte-Luce-sur-Loire, de 1976 à 2014

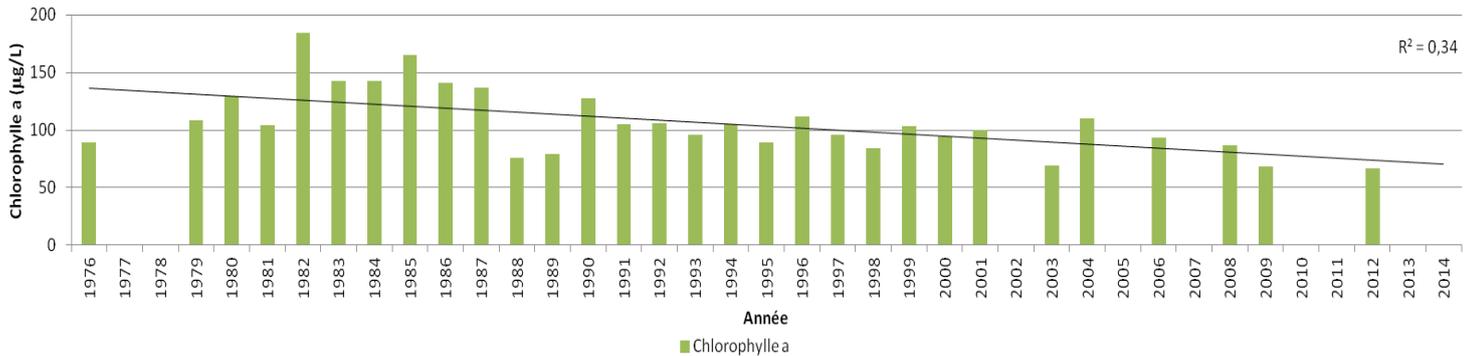


Figure 31 : Graphique de l'évolution de la moyenne annuelle des blooms algaux dont les concentrations en chlorophylle a excèdent 60 mg/L. Ils ne concernent que la station de Sainte-Luce-sur-Loire sur la période 1976 – 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)

La confrontation des résultats entre ce qui est observé en Loire et les évènements de prolifération algale visibles sur le littoral est difficile. En effet, les évènements récents d'eutrophisation observés sur la côte Atlantique en juillet et août 2013 et 2014, ne correspondent à aucune prolifération algale recensée dans les eaux de la Loire ces mêmes années. Si le phénomène d'eau colorée du 10 septembre 1989 observé à Trentemoult peut avoir un lien avec la prolifération algale du 5 septembre observée à Sainte-Luce-sur-Loire (112µg/L), celle du mois de juin 1989 observé à Saint-Nazaire est difficilement comparable aux teneurs en chlorophylle a mesurées à Cordemais le 1^{er} juin de la même année (<1 µg/L seulement). La donnée recueillie en Loire n'étant que mensuelle, il est probable que certains blooms ne soient pas observés en Loire mais qu'ils le soient sur la côte.

Enfin, les évènements présentés ici ne concernent que 6 stations réparties sur tout le linéaire du domaine d'étude du GIP LE (figure 32). Certains évènements très locaux et ponctuels, ont donc pu ne pas être pris en compte dans cette analyse, qui donne une tendance globale d'évolution de l'eutrophisation sur tout le continuum fluvio-estuarien de la Loire, de la Maine à la mer. Ceci est en partie dû aux données qui ne sont pas acquises dans l'optique de recenser des blooms mais qui ont pour objectif d'estimer une qualité globale des eaux.

GIP Loire Estuaire Synthèse des phénomènes d'eutrophisation observés en Loire, de la Maine à la mer depuis 1970

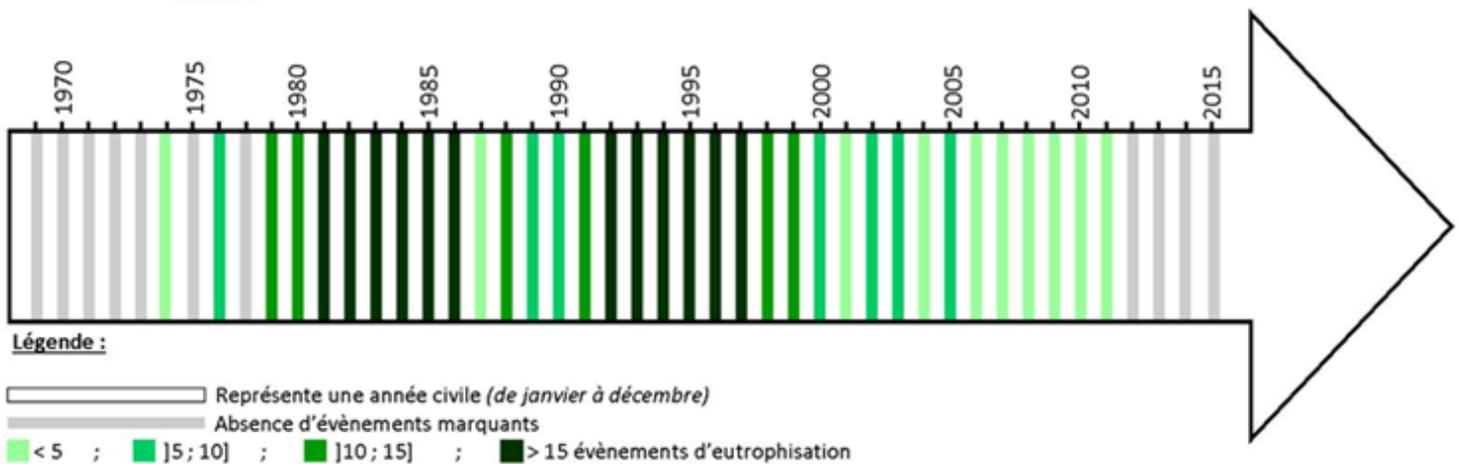


Figure 32 : Synthèse chronologique des évènements d'eutrophisation recensés en Loire, de la Maine à la mer de 1970 à 2014

CONCLUSION – PERSPECTIVES

L'objectif de l'étude était de dégager une tendance d'évolution des phénomènes d'eutrophisation de la Loire, de la Maine à la mer. L'évolution du bassin versant au cours du temps, et l'application des mesures restrictives prises à l'échelle européenne et nationale ont, peu à peu contribué à faire évoluer les conditions physico-chimiques des milieux aquatiques. Au cours de ces 40 dernières années, les teneurs en phosphates ont diminué sur le territoire, tout comme les teneurs en chlorophylle *a* et en phéopigments. Durant cette même période, les communautés phytoplanctoniques ont très probablement évolué avec des structures communautaires intra et inter-espèces qui ont pu être modifiées.

Au vue des résultats présentés, le constat est fait qu'au cours de ces quatre décennies, l'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer, s'est réduit en nombre et en intensité.

Cependant certains phénomènes d'eutrophisation et certaines crises d'hypoxie voire d'anoxie restent difficilement explicables avec des observations en Loire qui peuvent être complétées, afin d'établir un diagnostic précis de l'eutrophisation. La présence de plusieurs stations tout au long du continuum fluvio-estuarien est essentiel, car les stations ne présentent pas les mêmes caractéristiques en fonction de leur position géographique (apports de la Maine pour La Possonnière, remontée du bouchon vaseux en conditions d'étiage et de vives eaux à Sainte-Luce-sur-Loire, présence du bouchon vaseux à Cordemais, influence maritime à Saint-Nazaire etc.). Le diagnostic de l'eutrophisation, pourrait être complété en étendant l'étude aux autres stations existantes en Loire.

Afin de mieux comprendre la dynamique complexe qui lie les nutriments et le phytoplancton, il pourrait être intéressant d'étudier l'évolution des teneurs en carbone en Loire et de la mettre en relation avec les observations faites de l'eutrophisation. L'étude de l'évolution des rapports C/N/P/Si en Loire pourrait également fournir un éclairage complémentaire sur la biodisponibilité des nutriments en fonction des conditions de marée, de débit, etc.

La mise en corrélation des résultats avec les cycles de marées pourrait également fournir une première approche des interactions complexes qui ont lieu au sein de la masse turbide.



La Loire à Corsept, le 18/05/2015

RÉFÉRENCES

- Abonyi A, Léitao M, Lancon AM, Padišak J, (2012) *Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the river Loire (France)*, Hydrobiologia DOI:10.007/s10750.012.1130.0, 19p
- Abonyi A, Léitao M, Stankovic I, Boric S G, Varbiro G, Padišak J, (2014) *A large river (River Loire, France) survey to compare phytoplankton functional approaches: Do they display river zones in similar ways?*, In Ecological Indicators Vol 46, pp11-22
- ACEL, (1994) *Evaluation hydrologique de l'estuaire de la Loire*, Delft Hydraulics – Rapport d'étude de l'ACEL – Association Communautaire de l'Estuaire de la Loire, 56p
- AELB, (2003) *Etude de faisabilité de réduction des flux d'azote et de phosphore pour lutter contre l'eutrophisation phytoplanktonique côtière en Loire-Bretagne*, Rapport final du bureau d'étude SAFEGE CETIIS – Ingénieurs Conseils pour l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, 124p
- Aminot A, Guillaud J.F, Andrieux F, (1993) *Spéciation du phosphore et apports en baie de Seine orientale*, Oceanologica acta 1993, Vol 16 n°5-6, pp617-623
- Aminot A, Kérouel R, (2004), *Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses*. Ed. Ifremer, 336p
- Barroin G, (2003) *Phosphore, azote et prolifération des végétaux aquatiques*, Courrier de l'environnement de l'INRA – Institut National de la Recherche Agronomique n°48, pp13-25
- Barroin G, (2004) *Phosphore, azote, carbone... du facteur limitant au facteur de maîtrise*, Le courrier de l'environnement de l'INRA n°52, 25p
- Barroin G, (2007) *Face à l'eutrophisation, seul le phosphore compte*, Perspectives agricoles n°336, pp6-7
- Berland B.R, Bonin D.J, Maestrini S.Y, (1979) *Azote ou phosphore ? Considérations sur le « paradoxe nutritionnel » de la mer méditerranée*, Oceanologica acta 1980, Vol 3 n°1, pp135-142
- Bourauoi F, Grizzetti B, (2011) *Long term change of nutrient concentrations of rivers discharging in European seas*, Science of the Total Environment, Vol.409. pp4899-4916
- Carpenter S.R, (2005) *Eutrophication of aquatic ecosystems : Bistability and soil phosphorus*, Special series of National Academy of Sciences, Vol 102 n°29, pp102-105
- Cloern J.E, (2001) *Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem*, Marine ecology progress series, Vol 210, pp223-253
- Conley D.J, Paerl H.W, Howarth R.W, Boesch D.F, Seitzinger S.P, Havens K.E, Lancelot C, Likens G.E, (2009) *Controlling eutrophication : Nitrogen and phosphorus*, Science, Vol 323, pp1014-1015
- Conseil Européen. CE, (2014) *Comprendre les politiques de l'union européennes – Agriculture*, Offices des publications de l'union européenne, DOI : 10.2775/96670, 16p
- Crouzet P, (1983) *L'eutrophisation de la Loire*. Wat. Supply, Vol.1, n°1, pp131-144

- CSEEL, (1984) *Rapport final du Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire*, Rapport Scientifique et Technique n°55 du Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO), 142p
- Descy J.P, Léitao M, Everbecq E, Smitz J.S, Deliège J.F, (2011) *Phytoplankton of the River Loire, France : a biodiversity and modelling study*. Journal of plankton research, Vol.34, n°2, pp120-135
- DDASS, (1990) *Qualité des cours d'eau en Loire Atlantique – Aspects sanitaires*, Rapport d'étude de la Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales de Loire-Atlantique (DDASS-44), Service Hygiène du Milieu, 77p
- De Jonge V.N, Elliott M, Orive E, (2002) *Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem : eutrophication*, Hydrobiologia 475/476, pp1-19
- EEA, (2015) *Nutrients in freshwater*. Assessment published CSIO20/WAT003. European Environment Agency, on line <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/nutrients-in-freshwater/nutrients-in-freshwater-assessment-published-6>, consulted 01/04/2015
- Elser J.J, Braken M.E, Cleland E.E, Gruner D.S, Harpole W.S, Hillebrand H, Ngai J.T, Seabloom E.W, Shurin J.B, Smith J.E, (2007) *Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems*, Ecology letters 10, pp1-8
- Finkel Z.V, Beardall J, Flynn K.J, Quigg A, Rees T.A, Raven J.A, (2010) *Phytoplankton in a changing world: cell size and elemental stoichiometry*, Journal of phytoplankton research, Vol.32 n°1, pp119-137
- Foucart Y, (2002) *Le climat de la Terre, Les savoirs mieux*. Septemtrion, Presses universitaires, 166p
- Floury M, Delattre C, Ormerod S.J, Souchon Y, (2012) *Global versus local change effects on a large European river*, Science of the Total environment, Vol.441, pp220-229
- Foussard V, Etcheber H, (2011) *Proposition d'une stratégie de surveillance des paramètres physico-chimiques pour les estuaires de la Seine, de la Loire et de la Gironde*, Rapport du projet BEEEST : Vers une approche multicritère du bon état écologique des grands estuaires, 71p
- Gallenne B, (1974) *Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude de la « crème de la vase »*. Rapport de thèse sous la direction de F. Ottmann soutenue le 27 mai 1974. Institut des sciences de la nature – Département des sciences de la terre, université de Nantes, 323p
- GIP Loire Estuaire, (2002) *Observations et suivis environnementaux de la Maine à la mer*. Cahier d'indicateurs 2002 Loire Estuaire.
- GIP Loire Estuaire, (2012) *Fiche indicateur « Nutriments »*. Cahier d'indicateurs 2002 Loire Estuaire.
- Glanaud. S, (2008) *Interdiction des phosphates dans tous les produits lessiviels d'ici 2010. Synthèse sur les dispositions européennes en vigueur dans divers pays européens (UK, DK, NL, ALL, CH)*, Rapport de l'Onema, 28p
- Guillaud J.F, (1983) *La qualité des eaux dans l'estuaire de la Loire*. Rapport d'étude du Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire – CSEEL, Ministère de l'Environnement – Ministère de la Mer. 18p
- Hecky R.E, (1988) *Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments : a review of recent evidence on the effects of enrichment*, Limnol. Oceanographic, Vol.33 n°4, pp796-822

Kennedy V.S, (1986) *The estuary as a filterer*. Academic Press, New York

Journal Officiel de la République Française. JORF, (1992) *Loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau*, NOR : ENVX9100061L

Journal Officiel de la République Française. JORF, (1994) *Décret n°94-469 du 3 juin 1994 relatif à la collecte et au traitement des eaux usées mentionnées aux articles L. 372-1-1 et L. 372-3 du code des communes*, NOR : ENVE9420024D

Journal Officiel de la République Française. JORF, (1998) *Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation*, NOR: ATEP9870017A

Journal Officiel de la République Française. JORF, (2006) *Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques*, NOR: DEVX0400302L

Journal Officiel de la République Française. JORF, (2007) *Décret n°2007-491 du 29 mars 2007 relatif à l'interdiction des phosphates dans certains détergents*, NOR: DEVO0710002D

Journal Officiel de la République Française. JORF, (2010) *Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement*, NOR : DEV01001032A

Journal Officiel de l'union Européenne et du Conseil. JOCE, (1991a) *Directive n°91/676/CEE du 12/12/1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles*

Journal Officiel de l'union Européenne et du Conseil. JOCE, (1991b) *Directive n°91/271/CEE du 21/05/1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires*

Journal Officiel de l'union Européenne et du Conseil. JOCE, (2000) *Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau*, NOR : 300L0060

Journal Officiel de l'union Européenne et du Conseil. JOCE, (2008) *Directive n°2008/56/CEE établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin*

Lair N, (2001) *Regards croisés sur l'état de la Loire Moyenne : potamoplancton et qualité de l'eau, quel enseignement tirer de 20 années d'études ?*, Hydroécol. Appli. Tome.13 Vol.2, pp3-41

Larroude S, Massei N, Reyes-Marchant P, Delattre C, Humbert J.F, (2013) *Dramatic changes in a phytoplankton community in response to local and global pressures: a 24 year survey of the river Loire (France)*, Global Change Biology, Blackwell Publishing Ltd, Vol.19. pp1620-1631

Le Corre P, L'helguen S, Morin P, Birrien JL, (1992) *Conditions de formation des eaux colorées toxiques sur plateau continental Manche-Atlantique, cas de Gyrodinium cf. aureolum*. Hydroécol, Appl. Tome 4 Vol.2, pp173-188

Mackas D.L, Thomson R.E, Galbraith M, (2001), *Changes in the zooplankton community of the British Columbia continental margin, 1985-1999, and their covariation with oceanographic conditions*. In Can. J. Fish. Aquat. Sci. 58 : 685-702. Doi :10.1139/cjfas-58-4-685. pp 685-702

Marchand J, Goinard N, Sauriau P.G, (1994) *Estuaire de la Loire, Rapport de synthèse de l'APPEL 1984-1994 – Tome III Ressources vivantes*, Rapport de synthèse de l'Association pour la Protection de l'Environnement de l'Estuaire de la Loire – APEEL, 67p

MEDD, (2002) SEQ-Littoral, Systèmes d'évaluation de classification pour l'évaluation de la qualité des eaux littorales : grille d'aptitude aux usages et à la biologie. Contrat MEDD/Ifremer n°031-01, 26p

MEDD, (2003) SEQ-eau, Systèmes d'évaluation de classification pour l'évaluation de la qualité des cours d'eau, Rapport de présentation SEQ-eau V2 (version2). Agences de l'eau, 106p

Ménesguen A, (2001) *L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France*, Rapport IFREMER pour la commission Européenne – Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral DEL/EC/01.02, 58p

Ménesguen A, Dussauze M, (2005) *Simulation de l'effet sur l'eutrophisation côtière bretonne de 3 scénarios de réduction des teneurs en nitrate et phosphate de chaque bassin versant breton et de la Loire*, Rapport pour la région Loire-Bretagne et pour l'Agence de l'Eau Loire Bretagne. RST.DYNECO/EB08.08/AM, pp139-155

Minaudo C, Moatar F, Meybeck M, Curie F, Gassama N, Leitao M, (2013) *Loire River eutrophication mitigation (1981-2011) measured by seasonal nutrients and algal pigments*, Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World, IAHS Publi.361, 8p

Minaudo C, Meybeck M, Moatar F, Gassama N, Curie F, (2015) *Eutrophication mitigation in rivers: 30 years of trends in spatial and seasonal patterns of biogeochemistry of the Loire River (1980-2012)*, Biogeosciences Vol.12, DOI:10.51/bg-12-2549-2015, pp2549-2563

Moatar F, Gailhard J, (2006) *Water temperature behavior in the River Loire since 1976 and 1881*, Compt Rendus Geosciences DOI:2006/338.319-28

Nemery J, Garnier J, (2007) *Dynamique du phosphore dans le bassin de la Seine et son estuaire*, TSM étude n°4, pp33-45

Nixon S.W, (1995) *Coastal marine eutrophication : a definition, social causes, and future concerns*, Ophelia Vol.41, pp199-219

O'Brien T.D, Li W.K.W, Moràn X.A.G, (2012), *ICES Phytoplankton and Microbial Plankton Status Report 2009/2010*, Rapport de recherches collectives, N°313 Special Issue, International Council for the Exploration of the Sea. pp 7-22

Ornolfsdottir E.B, Lumsden S.E, Pinckney J.L, (2004) *Phytoplankton community growth-rate response to nutrient pulses in a shallow turbid estuary, Galveston Bay, Texas*, Journal of Phytoplankton research, Vol.26 n°3, pp325-339

Ottmann F, (1986) *Prise d'eau en Loire, Etude sur les matériaux en suspension*, Laboratoire de Géologie Marine et Appliquée – Aménagement du Littoral. Institut des Sciences et de la nature, département des sciences de la Terre, Université de Nantes, pp90-123

Paerl H.W, (1988) *Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters*. Limn oceanogr n°33 vol 2. American society of limnology and oceanography, pp 823-847

Petris G, (2010). An R package for dynamic linear models. Journal of Statistical Software, 36, 1–16.

- Redfield A.C, Ketchum B.H, Richard F.A, (1960) *The influence of organisms on the composition of sea-water. Contribution n°1113*, Woods Hole Oceanographic Institution and Contribution n°238, pp 26-77
- Relexans JC, Meybeck M, Billen G, Brugeaille M, Etcheber H, Somville M, (1988) *Algal and microbial processes involved in particulate organic matter dynamics in the Loire Estuary*, Estuarine, Coastal and Shelf science n°27, pp625-644
- Rincé Y, Guillaud J.F, Gallenne B, (1985) *Qualité des eaux en milieu estuarien : Suivi annuel de critères physiques et chimiques dans les eaux de l'estuaire de la Loire*, Hydrobiologia Vol.124, pp199-210
- Robbe D, (1975) *Influence des matières minérales en suspension sur la qualité des eaux de surface*, Rapport de recherche n°49, Ministère de l'Équipement, Laboratoires des Ponts et Chaussées, 123p
- Rybarczyk H, Elkaim B, Wilson J.G, Loquet N, (1995) *L'eutrophisation en Baie de Somme : Mortalité des peuplements benthiques par anoxie*, Oceanologica acta Vol.9 n°2, pp131-140
- Saliot A, Lorre A, Marty J.C, Scribe P, Tronczynski J, Meybeck M, Dessery S, Marchand M, Caprais J.C, Cauwet G, Etcheber H, Relexans J.C, Ewald M, Berger P, Belin C, Gouleau D, Bilen G, Somville M, (1984) *Biogéochimie de la matière organique en milieu estuarien : stratégies d'échantillonnage et de recherches élaborées en Loire (France)*, Oceanologica acta 1984, Vol.7 n°2, pp191-207
- Sauriau P.G, (1994) *Éléments de réflexion sur l'hydrobiologie de l'estuaire de la Loire*, Rapport final, Institut des Substances et Organismes de la Mer – ISOMer, Université de Nantes, 70p
- Schindler D.W, (2006) *Recent advances in the understanding and management of eutrophication*, Limnol. Oceanographic, Vol.51 n°1, pp356-363
- Seitzinger S.P, Mayorga E, Bouwman A.F, Kroeze A, Beusen A.H.W, Billen G, Van Drecht G, Dumont E, Fekete B.M, Garnier J, Harrison J.A, (2010) *Global river nutrient export : a scenario analysis of past and future trends*. Global Biogeochemical Cycles, Vol.24. 16p
- Smith V.H, (2006) *Eutrophication of freshwater and marine ecosystems*, Limnol. Oceanographic, Vol.51 n°1, pp351-355
- SMN, (1989) *Aménagement hydraulique de la Loire dans la région de Ponts-de-Cé*, Etude d'impact de la SOGREAH – Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques pour le SMN, Service Maritime et de Navigation de Nantes – Dossier 801430R1, pp31-74
- Sournia A, Belin C, Billard C, Catherine M, Erard-le denn E, Fresnel J, Lassus P, Pastoureaud A, Soulard R, (1992) *The repetitive and expanding occurrence of a green, bloom-forming dinoflagellate (dinophyceae) on the coasts of France*. Cryptogamie. Algol n°13, pp1-13
- Trommer G, Leynaert A, Klein C, Naegelen A, Beker B, (2012) *Phytoplankton phosphorus limitation in a North Atlantic coastal ecosystem not predicted by nutrient load*, Journal of Plankton research, Vol.35 n°6, pp1207-1219
- Yin K, Qian P.Y, Wu M.C, Chen J.C, Huang L, Xinyu S, Jian W, (2001) *Shift from P to N limitation of phytoplankton growth across the Peral River estuarine plume during summer*, Marine ecology progress series, Vol.221, pp17-28

Viconneau J.C, (1992) *Lutte contre l'eutrophisation en France*, Bulletin du conseil général de génie rural, des eaux et des forêts n°33, pp43-53

Vitousek P.M, Porder S, Houlton B.Z, Chadwick O.A, (2010) *Terrestrial phosphorus limitation : mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions*, Ecological applications, Vol.20 n°1, pp5-15

SITOGRAFIE

Agence de l'eau Loire Bretagne - *consulté le 23/07/2015*

<http://www.eau-loire-bretagne.fr>

Legifrance – Portail de diffusion du droit – *consulté le 08/07/2015*

<http://www.legifrance.gouv.fr/Droit-francais/Guide-de-legistique/V.-Schemas-logiques-et-cas-pratiques/5.2.-Cas-pratiques/5.2.4.-Groupements-d-interet-public>

Legifrance – Loi n°82-610 du 15 juillet 1982 d'orientation et de programmation pour la recherche et le développement technologique de la France

http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=E50A96C4C4129B5B1114E781B37BACF1.tpdila09v_1?cidTexte=JORFTEX000000691990&dateTexte=20110419

Legifrance – Loi n°2001-525 du 17 mai 1982 de simplification et d'amélioration de la qualité du droit

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024021430&categorieLien=id>

Portail de surveillance de l'environnement littoral d'Ifremer – *consulté le 02/07/2015*

<http://wwz.envlit.ifremer.fr>

Portail de l'économie et des finances – *consulté le 08/07/2015*

<http://www.economie.gouv.fr/daj/gip>

Portail de l'eau – consulté le 08/07/2015

<http://www.eaufrance.fr/>

Portail de l'observatoire de l'eau en Maine – Anjou – consulté le 21/08/2015

<http://www.eau-anjou.fr/>

Portail du Groupement d'Intérêt Public Loire estuaire – *consulté le 08/07/2015*

<http://www.loire-estuaire.org/accueil>

Portail du SAGE Loire estuaire – *consulté le 08/07/2015*

<http://www.sage-estuaire-loire.org/>

LISTE DES ABBREVIATIONS

AELB	Agence de l'Eau Loire Bretagne		
ACEL	Association Communautaire de l'Estuaire de la Loire	MEFM	Pêches Maritimes
AILE	Association des Industriels de Loire Estuaire	NOAA	Masse d'Eau Fortement Modifiée
ASLO	American Society of Limnology et Oceanography		National Océanic and Atmospheric Administration
ASTER (cellule)	Cellule d'Animation et de Suivis des travaux En Rivière et milieux aquatiques	NQE	Norme de Qualité Environnementale
BDD	Base De Données	OSUR	Banque de données de l'AELB
CARENE	Communauté d'Agglomération de la REgion Nazairienne et de l'Estuaire	RCA	Réseau Complémentaire Agence
CG44	Conseil Général du 44	RCO	Réseau de Contrôle Opérationnel
CIEM	Conseil International pour l'Exploration de la Mer	RCS	Réseau de Contrôle et de Surveillance
CMB	Cellule de Mesure et de Bilan	REBENT	REseau BENThique
CNEXO	Centre National pour l'Exploitation des Océans	REMI	REseau de contrôle MIcrobiologique
COMEXO	COMité pour l'Exploitation des Océans	REMORA	REseaux MOllusque des Rendements Aquacole
DCE	Directive Cadre européenne sur l'Eau	RNO	Réseau National d'Observation
DDTM44	Direction Départemental des Territoires et de la Mer	REPHY	REseau de surveillance du PHYtoplancton et des toxines phytoplanctonique
DERU	Directive sur les Eaux Résiduaire et Urbaines	RSL	Réseau de Suivi Lagunaire
DIETE	Diagnostic ETendu de l'Eutrophisation	SAGE	Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux
DIN	Dissolved Inorganic Nitrogen	SEEE	Système d'évaluation de l'état de l'eau
DIP	Dissolved Inorganic Phosphorus	SEQ-eau	Système d'évaluation de la Qualité de l'eau
DLM	Dynamic Linear Model	SEQ-littoral	Système d'évaluation de la Qualité des eaux littorales
DREAL	Direction Régional de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement	SYVEL	SYstème de Surveillance de l'Estuaire de la Loire
FEDER	Fond Européen de DEveloppement Régional	UMNP	Union Maritime Nantes Ports
GIP	Groupement d'Intérêt Public	VNF	Voies Navigables de France
GIP LE	Groupement d'Intérêt Public Loire estuaire	WGPM E	Working Group on Phytoplankton and Microbial Ecology
GPMNSN	Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire		Groupe de travail sur le phytoplancton et l'écologie microbienne
IBD	Indice Biologique Diatomées	ZERO-REP	Zero-representation value
ICES	International Council for Exploration of the Sea		Valeur représentant zéro
	Conseil International pour l'Exploration de la Mer		
IGO	Impact des Grands aménagements		
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER		
ISTPM	Institut Scientifique et Technique des		

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Carte du domaine d'étude du GIP Loire Estuaire : La Loire, de la Maine à mer (source : GIP Loire Estuaire) ..	1
Figure 2 : Ensemble des membres et des financeurs du GIP Loire Estuaire (source : GIP Loire Estuaire).....	2
Figure 3 : Carte du bassin versant de la Loire, de sa source à l'embouchure (d'après cartographie DIREN Centre, 2003 – Donnée ©SRTM NASA/JPL -© BDCarthage – IGN)	3
Figure 4 : Carte des différents secteurs de la Loire et de son estuaire (source : GIP Loire Estuaire)	4
Figure 5 : Illustration des trois estuaires : estuaire dynamique, estuaire salé et estuaire turbide (source : GIP Loire Estuaire)	5
Figure 6 : Carte du Mor Braz, secteur d'étude du programme de recherche DIETE (source : www.googlemaps.fr).....	6
Figure 7 : Cycle terrestre et océanique de l'azote (source : Bourque, 2010).....	9
Figure 8 : Cycle terrestre et océanique du phosphore (source : Bourque, 2010)	9
Figure 9 : Frise de synthèse des événements d'eutrophisation en Loire selon la littérature grise.....	18
Figure 10 : Synthèse des mesures mises en place en Europe et en France pour l'amélioration de la qualité de l'eau et de sa gestion (d'après legifrance.fr).....	21
Figure 11 : Synthèse des stations de suivis présentes sur le domaine d'étude du GIP Loire Estuaire (source : GIP Loire Estuaire)	25
Figure 12 : Synthèse des stations étudiées dans le cadre du stage (source GIP Loire Estuaire).....	26
Figure 13 : Graphique de l'évolution des concentrations en nitrates à Sainte-Luce-sur-Loire et du débit à Montjean-sur-Loire de 1971 à 2014 (sources : AELB, Département 44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)	31
Figure 14 : Graphique de l'évolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014 (sources : AELB, Département 44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)	31
Figure 15 : Graphique de l'évolution des flux de nitrates à Sainte-Luce-sur-Loire et du débit moyen annuel en m ³ /s à Montjean-sur-Loire de 1971 à 2014, Flux $F = C \times Q$ avec $C = \frac{\sum(Q_j \times C_j)}{\sum Q_j}$ (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire).....	32
Figure 16 : Synthèse de l'évolution longitudinale des moyennes annuelles des concentrations en nitrates de 1971 à 2014 pour les 6 stations étudiées, Points kilométriques : SN (2), CO (25), NA (45), SL (62), MJ (117), PO (132), (sources : AELB, Département 44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)	32
Figure 17 : Synthèse des moyennes annuelles des concentrations en nitrates des 6 stations étudiées et du débit moyen annuel à Montjean-sur-Loire de 1971 à 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)	33
Figure 18 : Graphique de l'évolution des concentrations en phosphore total et des MES à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014, (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)	33
Figure 19 : Graphique de l'évolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total à Sainte-Luce-sur-Loire de 1982 à 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)	34
Figure 20 : Graphique de l'évolution des flux annuels de phosphore total à Sainte-Luce-sur-Loire et du débit moyen annuel à Montjean-sur-Loire de 1982 à 2014, Flux $F = C \times Q$ avec $C = \frac{\sum(Q_j \times C_j)}{\sum Q_j}$ (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)	34
Figure 21 : Synthèse de l'évolution longitudinale des moyennes annuelles des concentrations en phosphore total de 1982 à 2014 pour les 6 stations étudiées, Points kilométriques : SN (2), CO (25), NA (45), SL (62), MJ (117), PO (132), (sources : AELB, Département 44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)	35
Figure 22 : Synthèse des moyennes annuelles de concentrations en chlorophylle a et en phéopigments pour les années 1983, 1993, 2003 et 2013 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire).....	36
Figure 23 : Synthèse de la répartition de la chlorophylle a et des phéopigments dans les eaux mélangées et les eaux douces entre 1983 et 2012, date à laquelle les données existent pour chacun des six stations étudiées (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)	37
Figure 24 : Extrait de la synthèse des variations saisonnières et annuelles de la chlorophylle a pour 3 stations, Montjean-sur-Loire, Cordemais et Saint-Nazaire (Mindin) en fonction du débit à Montjean-sur-Loire et de	

<i>l'ensoleillement à Nantes (Bouguenais), (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, Météo-France, GIP Loire Estuaire)</i>	<i>37</i>
Figure 25 : <i>Graphique de l'évolution des concentrations en chlorophylle a, nitrates et phosphates à Sainte-Luce-sur-Loire de 1981 à 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)</i>	<i>39</i>
Figure 26 : <i>Graphique de l'évolution de la concentration en chlorophylle a et en oxygène dissous à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)</i>	<i>39</i>
Figure 27 : <i>Extrait du fichier CSV de la station de Montjean-sur-Loire</i>	<i>51</i>
Figure 28 : <i>Schéma présentant le décalage saisonnier des maximums de concentration en chlorophylle a observé dans le temps (Période estivale en orange et printanière en vert ; absence de données en gris).....</i>	<i>53</i>
Figure 29 : <i>Schéma de la diffusion des nitrates à l'interface eau/sédiment</i>	<i>54</i>
Figure 30 : <i>Graphique de l'évolution du nombre de phénomènes d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer entre 1976 et 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)</i>	<i>62</i>
Figure 31 : <i>Graphique de l'évolution de la moyenne annuelle des blooms algaux dont les concentrations en chlorophylle a excèdent 60 mg/L. Ils ne concernent que la station de Sainte-Luce-sur-Loire sur la période 1976 – 2014 (sources : AELB, Département44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)</i>	<i>63</i>
Figure 32 : <i>Synthèse chronologique des événements d'eutrophisation recensés en Loire, de la Maine à la mer de 1970 à 2014</i>	<i>63</i>

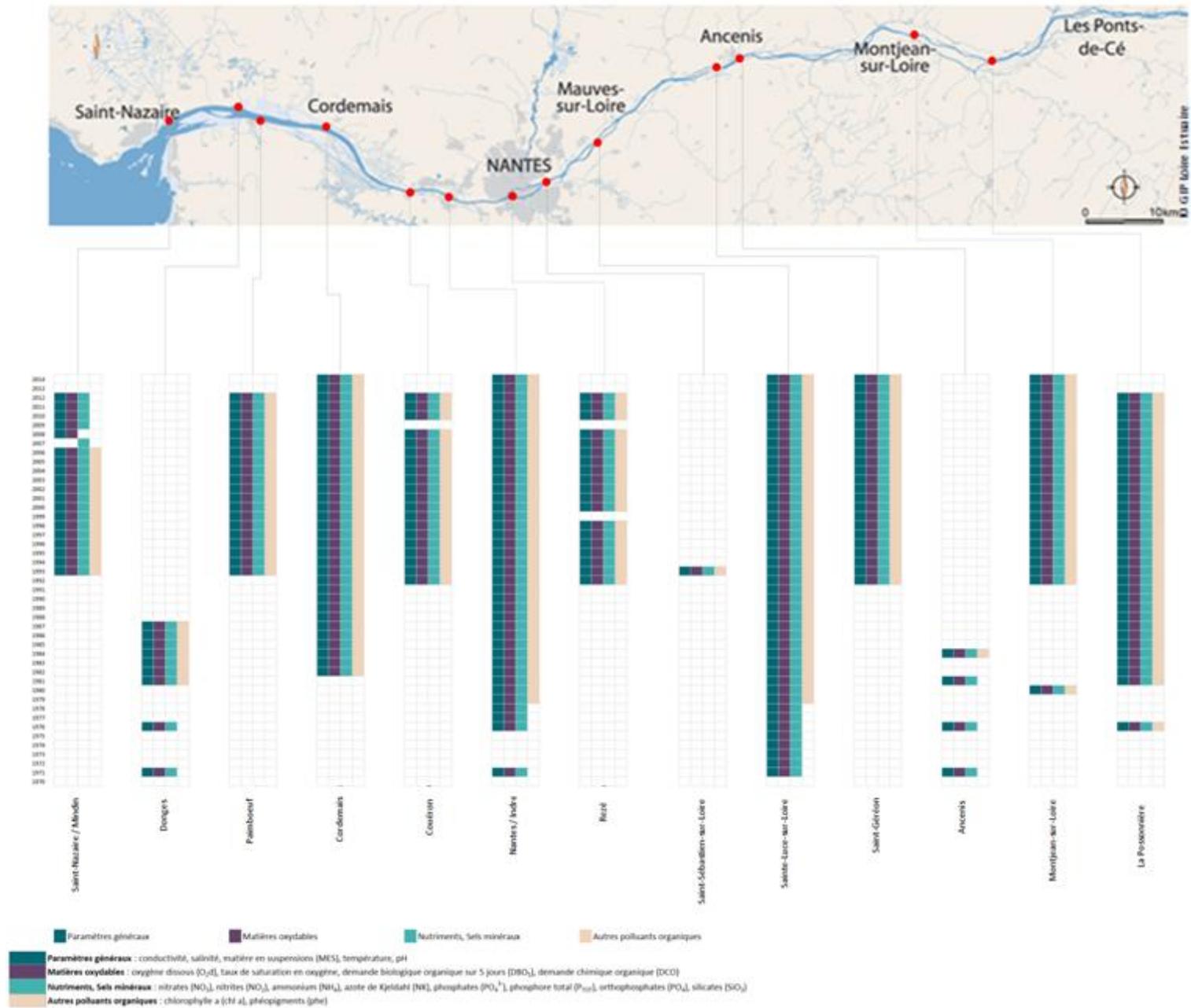
TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : <i>Flux annuels dans les grands fleuves français selon Aminot & al, 1993</i>	<i>10</i>
Tableau 2 : <i>Evolution du rapport C/N/P en fonction des conditions du milieu, selon Redfield, 1960</i>	<i>10</i>
Tableau 3 : <i>Valeur seuil du taux de saturation en oxygène dissous pour différentes populations piscicoles selon Rosenberg & Loo, 1988 ; Thimel, 1988</i>	<i>13</i>
Tableau 4 : <i>Tableau de synthèse des évènements recensés en Loire depuis 1970.....</i>	<i>19</i>
Tableau 5 : <i>Transposition du droit européen dans le droit français (d'après legifrance.fr)</i>	<i>20</i>
Tableau 6 : <i>Synthèse de l'évaluation des états écologiques et chimiques des masses d'eaux douces et de transition dans l'application française de la DCE (d'après JOCE, 2000 ; JORF, 2010).....</i>	<i>22</i>
Tableau 7 : <i>Synthèse du nombre moyen de valeur par mois et de la fréquence d'acquisition des 6 stations étudiées dans le cadre du stage</i>	<i>27</i>
Tableau 8 : <i>Synthèse des variables utilisées pour la définition des champs de la base de données</i>	<i>27</i>
Tableau 9 : <i>Tableau de synthèse des flux annuels des années exceptionnelles (sèches et humides).....</i>	<i>32</i>
Tableau 10 : <i>Variations des valeurs seuils dans le flux de données entrants et valeurs finales</i>	<i>42</i>
Tableau 11 : <i>Synthèse et origine des "zero-representation value"</i>	<i>42</i>
Tableau 12 : <i>Mise en avant du constat de forte diminution des concentrations en chlorophylle a et en phéopigment à partir de leur année de rupture respective (année où la valeur de la moyenne annuelle est devenue inférieure à la moyenne annuelle de la chronique entière).....</i>	<i>45</i>
Tableau 13 : <i>Synthèse des champs nécessaire au bon fonctionnement du DLM et correspondance avec la base de données du GIP Loire Estuaire.....</i>	<i>49</i>
Tableau 14 : <i>Synthèse des codes de référence Ifremer pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire</i>	<i>49</i>
Tableau 15 : <i>Synthèse des classes de qualité des paramètres d'intérêt relatif au volet "biologie" du SEQ-eau (d'après le SEQ-eau).....</i>	<i>57</i>
Tableau 16 : <i>Synthèse des classes d'état des paramètres d'intérêt relatif à l'état de la qualité biologique (d'après la DCE 2000/60)</i>	<i>58</i>
Tableau 17 : <i>Synthèse des classes de qualité des paramètres d'intérêt relatif au volet "biologie" du SEQ-littoral (d'après le SEQ-littoral)</i>	<i>58</i>

Tableau 18 : Définition des niveaux trophiques d'une masse d'eau en fonction des concentrations en chlorophylle a selon le NOAA " National Oceanic and Atmospheric Administration" (source : SEQ-littoral)	58
Tableau 19 : Comparaison des valeurs seuils pour les éléments azotés entre les SEQ-eau et le SEEE de la DCE.....	59
Tableau 20 : Tableau de comparaison entre les événements recensés dans la bibliographie et les données brutes synthétisées.....	60
Tableau 21 : Synthèse des valeurs moyennes des concentrations en nitrates, phosphates, silicates et oxygène dissous ainsi que de la température de l'eau par classe de 60 µg/L	61
Tableau 22 : Première approche des gammes proposée pour l'identification d'un phénomène d'eutrophisation en Loire, de la Maine à la mer	62

ANNEXES

Annexe 2 : Bilan des données existantes par paramètre



Annexe 3 : Synthèse du nombre de valeur moyenne mensuelle par paramètre et par station

	La Possonnière	Montjean-sur-Loire	Sainte-Luce-sur-Loire	Nantes (Indre)	Cordemais	Saint-Nazaire
Nombre de valeurs moyenne par mois	1.03	1.54	0.95	0.91	0.84	0.9
<i>Nitrate</i>	1.18	1.62	1.04	0.97	0.89	0.98
<i>Nitrite</i>	1.18	1.62	1.03	0.97	0.89	1.69
<i>Ammonium</i>	1.18	1.61	1.06	0.97	0.92	0.97
<i>Azote de Kjeldahl</i>	0.98	1.58	0.87	0.83	0.79	1
<i>Phosphate</i>	0.95	1.13	0.87	0.87	0.9	0.99
<i>Phosphore total</i>	1.79	1.68	1.03	1.39	0.88	1.01
<i>Orthophosphate</i>	1.12	2.17	1.01	0.91	0.72	1.03
<i>Silicate</i>	0.41	2.18	0.6	0.57	0.69	0.2
<i>Chlorophylle a</i>	0.17	0.92	0.7	0.74	0.75	0.74
<i>Phéopigments</i>	0.69	0.92	0.85	0.72	0.75	0.67
<i>MES</i>	1.18	1.65	1.04	0.95	0.92	1.01
<i>pH</i>	1.18	1.65	1.04	0.97	0.69	0.99
<i>Température</i>	1.18	1.66	1.07	1.01	1.04	1.01
<i>Conductivité</i>	1.17	1.66	1.03	0.97	0.91	1.01
<i>Oxygène dissous</i>	1.17	1.66	1.67	0.99	0.82	1.01
<i>Taux de saturation</i>	1.17	1.66	1.04	0.94	0.78	1
<i>DBO₅</i>	1.17	1.46	1	0.92	0.74	0.99
<i>DCO</i>	0.75	0.89	0.89	0.83	0.96	0.72
<i>Salinité</i>	1.18	1.66	1.03	0.96	0.79	1.01
<i>Ensoleillement</i>	Valeur quotidienne					
<i>Débit</i>	Valeur quotidienne					

	La Possonnière	Montjean-sur-Loire	Ancenis	Saint-Géréon	Sainte-Luce-sur-Loire	Saint-Sébastien-sur-Loire	Rezé	Nantes (Indre)	Couëron	Cordemais	Paimboeuf	Donges	Saint-Nazaire (Mindin)
Nombre total de données	7179	23 279 (7207 + 16 072 de données débit)	247	4331	8543	63	3133	16 944 (7997 + 8947 de données ensoleillement)	3334	5656	3208	646	2859

Annexe 4 : Notice explicative de la Base de donnée – Zoom sur les unités de mesure des différents paramètres

24	Feuille 2 et autres	"La Possonnière" : Présentation des données existantes (1970 - 2015) pour différents paramètres
25	Date de prélèvement	#
26	Débit	Débit en m ³ /seconde
27	Nitrates (NO₃)	Concentration en nitrates NO ₃ en mg(NO ₃)/L
28	Nitrites (NO₂)	Concentration en nitrites NO ₂ en mg(NO ₂)/L
29	Ammonium (NH₄)	Concentration en ammonium NH ₄ en mg(NH ₄)/L
30	Azote de Kjeldalh (Nt K)	Concentration en azote organiques et ammonicales à l'exclusion des nitrites et des nitrates en mg(N)/L
31	Phosphate (PO₄³⁻)	Concentration en phosphate PO ₄ ³⁻ en mg(PO ₄ ³⁻)/L
32	Phosphore total (P_{tot})	Concentration en phosphore total particulaire et dissous en mg(P)/L
33	Orthophosphate (PO₄)	Concentration en phosphate PO ₄ en mg(PO ₄)/L
34	Silicates (SiO₃)	Concentration en silicates SiO ₂ en mg(SiO ₂)/L
35	Chlorophylle a (chloa)	Concentration en chlorophylle a en µg/L
36	Phéopigments	Concentration en phéopigments en µg/L
37	Matières en suspensions (MES)	Concentration en matière en suspensions en mg/L
39	Salinité	Salinité
40	pH	Potentiel hydrogène en unité pH
41	Température de l'eau	Température de l'eau en °C
42	Conductivité	Conductivité en µS/cm
43	O₂ dissous	Teneur en O ₂ dissous en mg(O ₂)/L
44	Saturation en O₂	Taux de saturation en O ₂ en %
45	DBO₅	Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours à 20°C en mg(O ₂)/L
46	DCO	Demande Chimique en Oxygène en mg(O ₂)/L
47	Heure de prélèvement	#
48	Coefficient	Coefficient de marée
51	Qual_exemple	Code d'analyse justifiant des résultats d'analyse inférieurs/supérieurs aux valeurs seuils ²

52

53 1 : Libellé explicite ne nécessitant pas de justification

54 2 : Code 1 : Concentrations mesurées se situant dans la gamme de validité, celles-ci sont supérieures aux seuils de quantification ou inférieures aux seuils de saturation ; Code 10 : Concentrations mesurées inférieures aux seuils de quantification

55

Annexe 5 : Exploitation et compréhension des feuillets « notice »

Logo du GIP Loire Estuaire

Mise à jour - Graphiques de la fiche indicateur "Les Nutriments" L2 A2a — Titre du fichier

Nom du fichier : Graphiques_L2A2a — Nom du fichier dans les fichiers GIP Loire Estuaire

Source des données : Base de données OSUR (AELB) + Extraction CG44 + Extraction DDTM44 + Banque HYDRO (DREAL)
 Extraction OSUR - Agence de l'Eau Loire Bretagne (15/04/2015) P:\Henry_Sybil\1_Données_2015\1_Producteurs\AELB_20150415
 Extraction Conseil Général 44 (02/04/2015) P:\Henry_Sybil\1_Données_2015\1_Producteurs\CG44_C.Dumottay
 Extraction Direction Départemental des Territoires et de la Mer (05/05/2015) P:\Henry_Sybil\1_Données_2015\1_Producteurs\DDTM44
 Banque HYDRO - Direction Régional de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement P:\Henry_Sybil\1_Données_2015\1_Producteurs\DREAL_PdL

Présentation des feuillets existants dans le fichier

Feuille1 — L2 A2 a-1: Evolution des concentrations en nitrates 1971-2014
Feuille2 — L2 A2 a-2: Evolution des concentrations en phosphore total 1971-2014
Feuille3 — L2 A2 a-3: Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates, phosphore total et phosphates 1971-2014
Feuille4 — L2 A2 a-4a: Evolution longitudinale des nitrates 1971-2014
Feuille5 — L2 A2 a-4b: Evolution des flux annuels en nitrates 1971-2014
Feuille6 — L2 A2 a-5a: Evolution longitudinale du phosphore total 1971-2014
Feuille7 — L2 A2 a-5b: Evolution des flux annuels en phosphore total 1971-2014

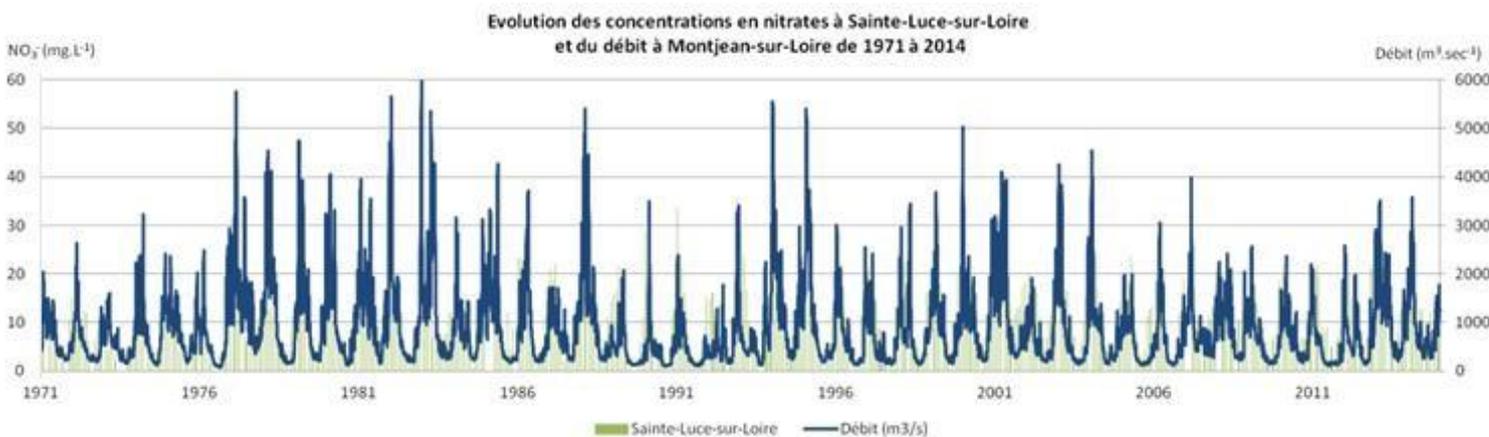
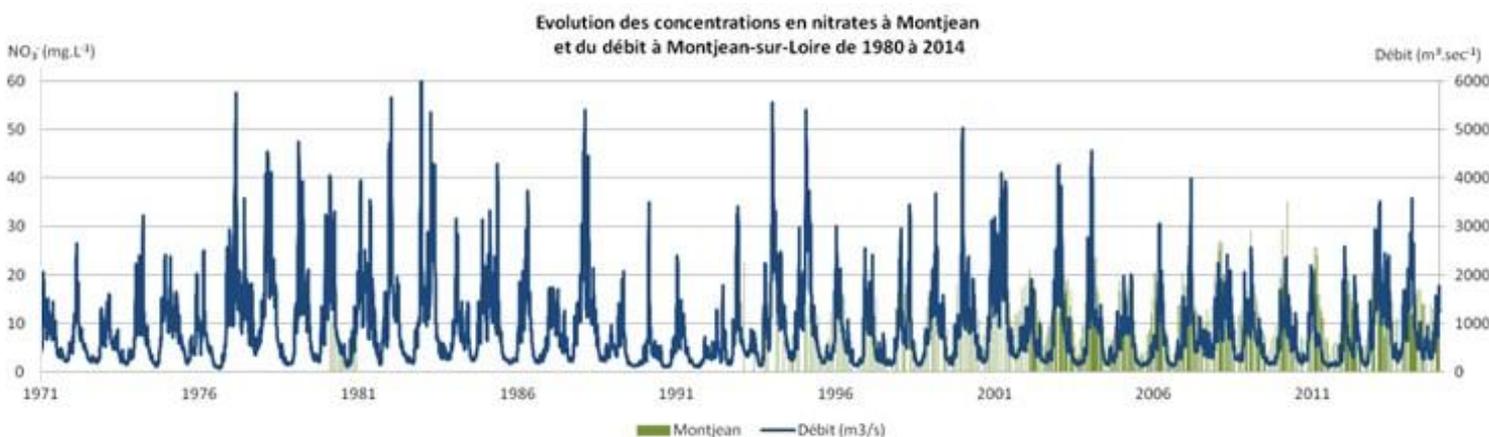
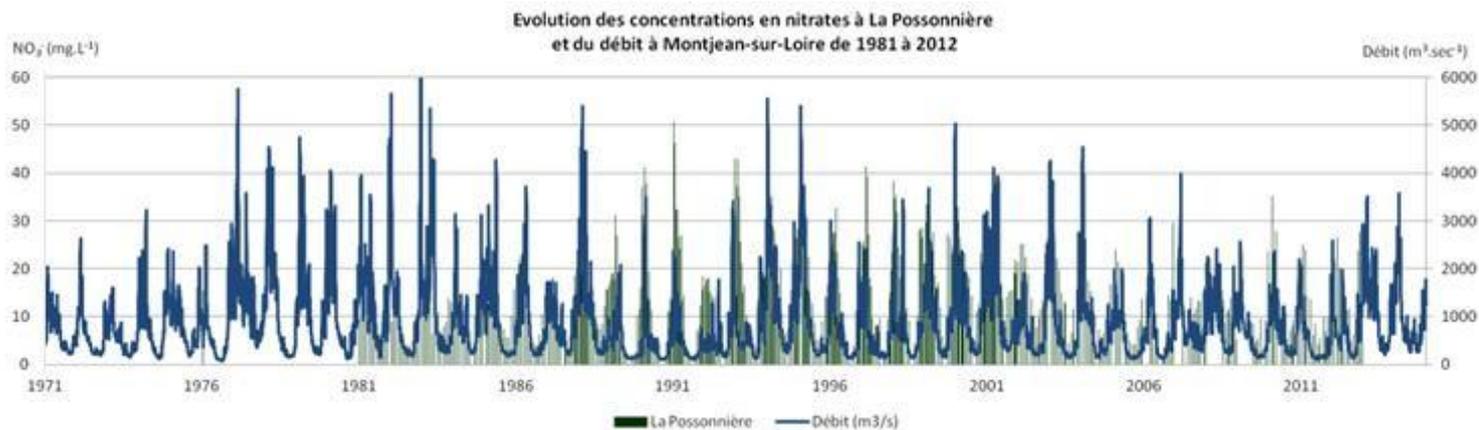
Création : 28/07/2015 — Date de création et de mise à jour des fichiers
Mise à jour : 03/08/2015

Zone dédiée aux "Nota Bene" et autre informations jugée utile à la compréhension de l'architecture du fichier

Notice L2 A2 a-1 L2 A2 a-2 L2 A2 a-3 L2 A2 a-4a L2 A2 a-4b L2 A2 a-5a L2 A2 a-5b

Annexe 6 : Synthèse des résultats de la mise à jour obtenus pour les 6 stations étudiées

- Evolution des concentrations en nitrates pour les stations étudiées et du débit à Montjean-sur-Loire (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)



Evolution des concentrations en nitrates à Nantes/Indre et du débit à Montjean-sur-Loire de 1976 à 2014



Evolution des concentrations en nitrates à Cordemais et du débit à Montjean-sur-Loire de 1981 à 2013

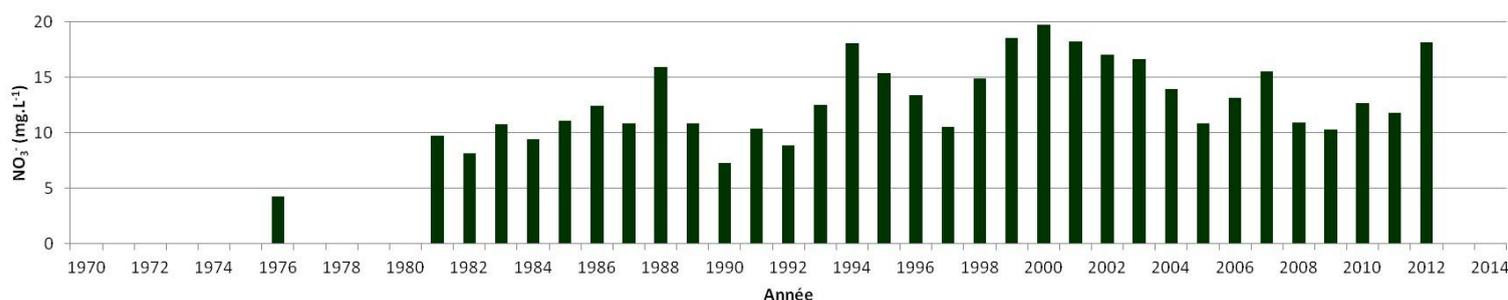


Evolution des concentrations en nitrates à Saint-Nazaire et du débit à Montjean-sur-Loire de 1993 à 2007

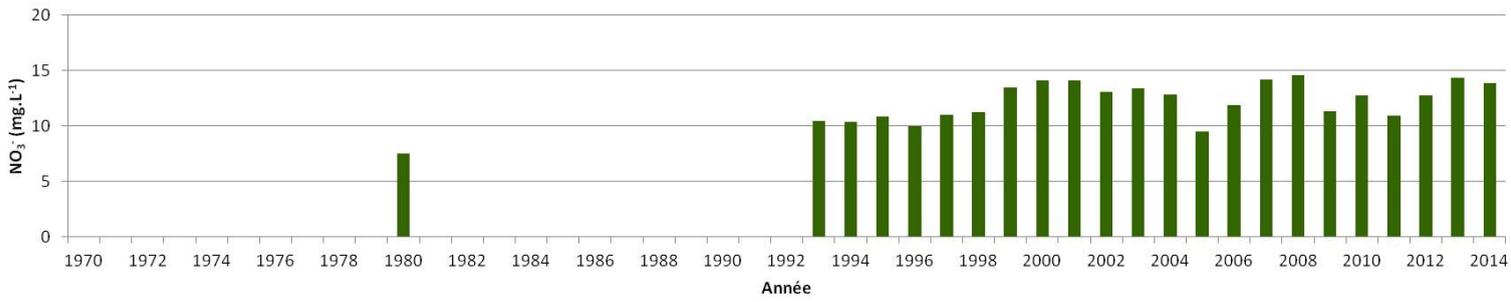


➤ Evolution de la moyenne des concentrations en nitrates pour les 6 stations étudiées (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, GIP Loire Estuaire)

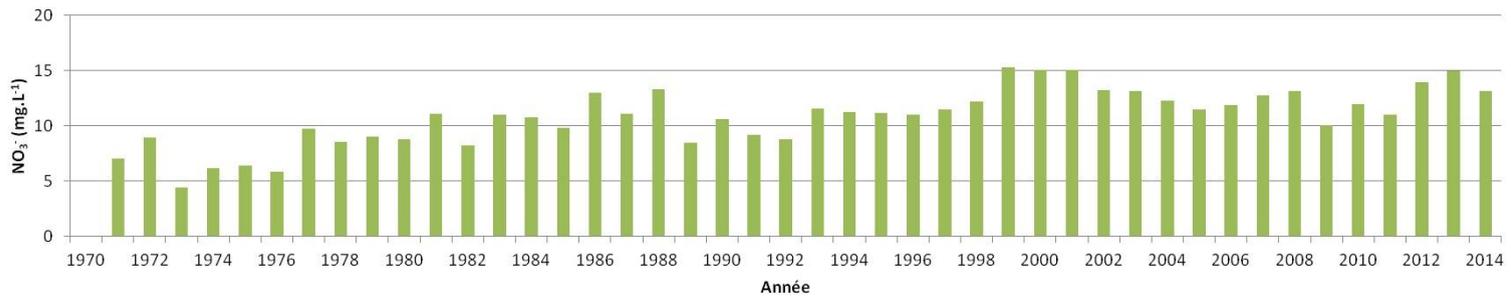
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates à La Possonnière de 1976 à 2012



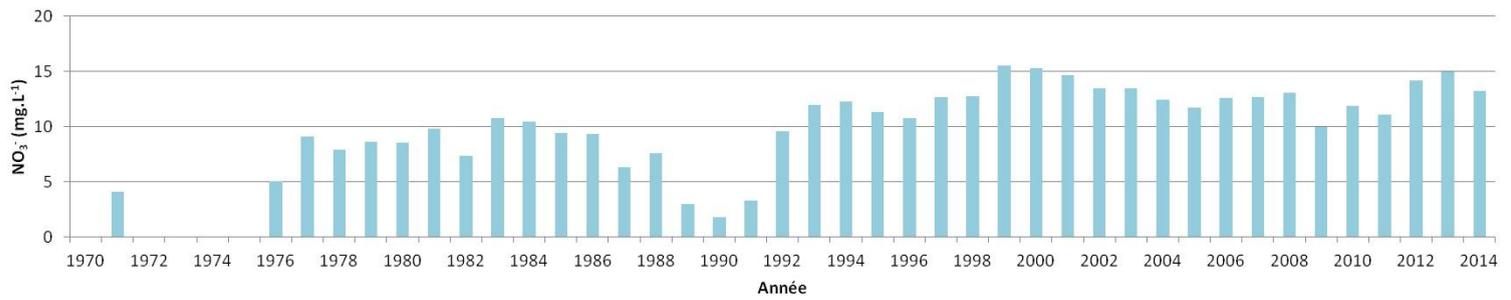
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates
à Montjean de 1980 à 2014



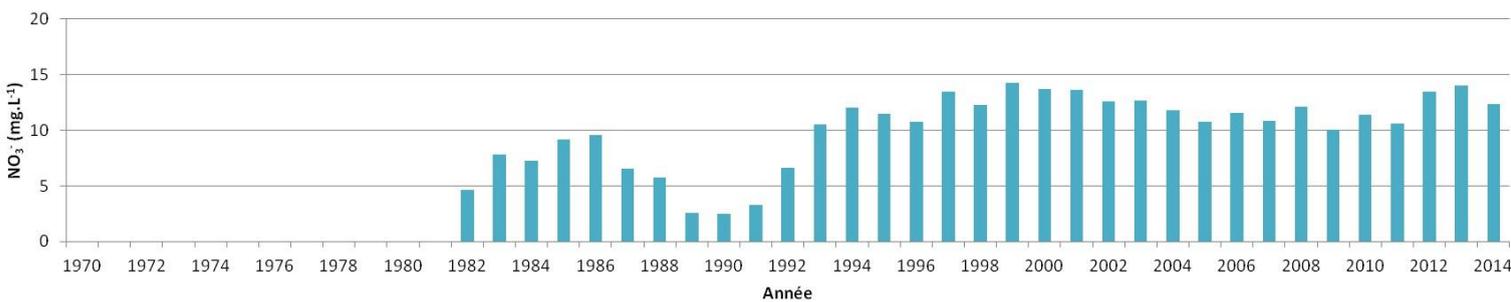
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates
à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014



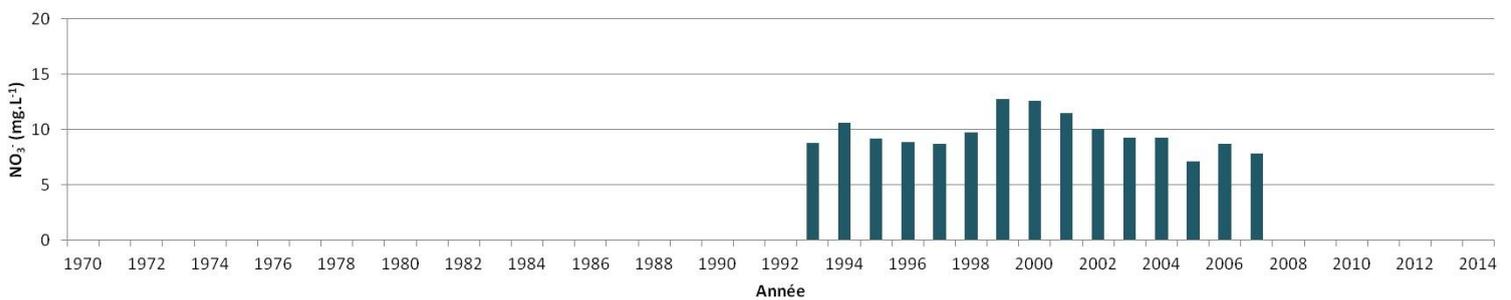
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates
à Nantes/indre de 1971 à 2014



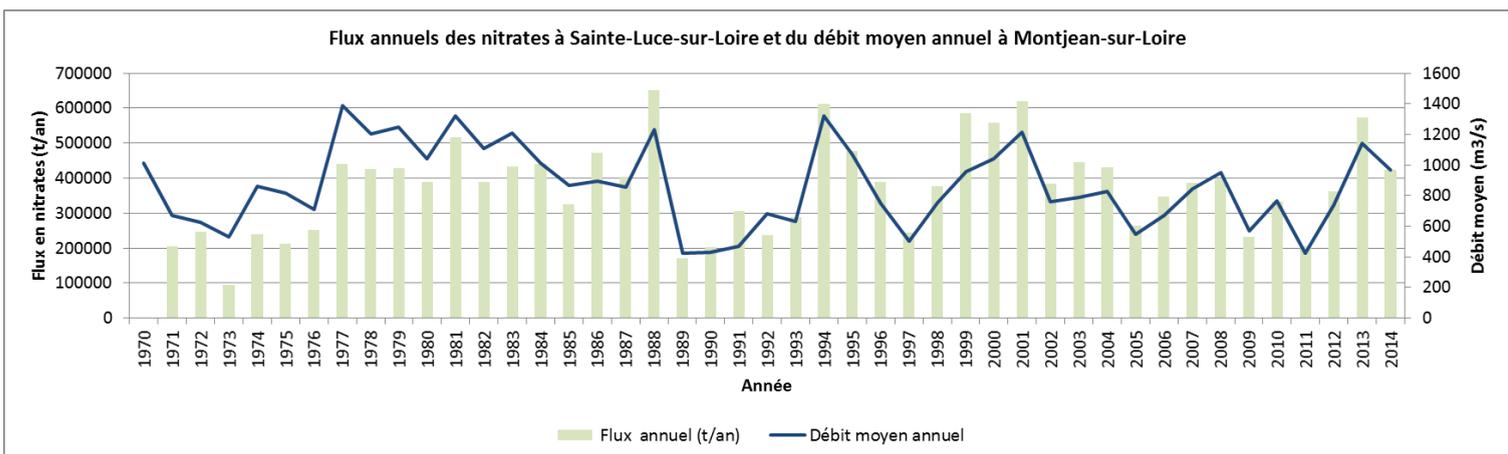
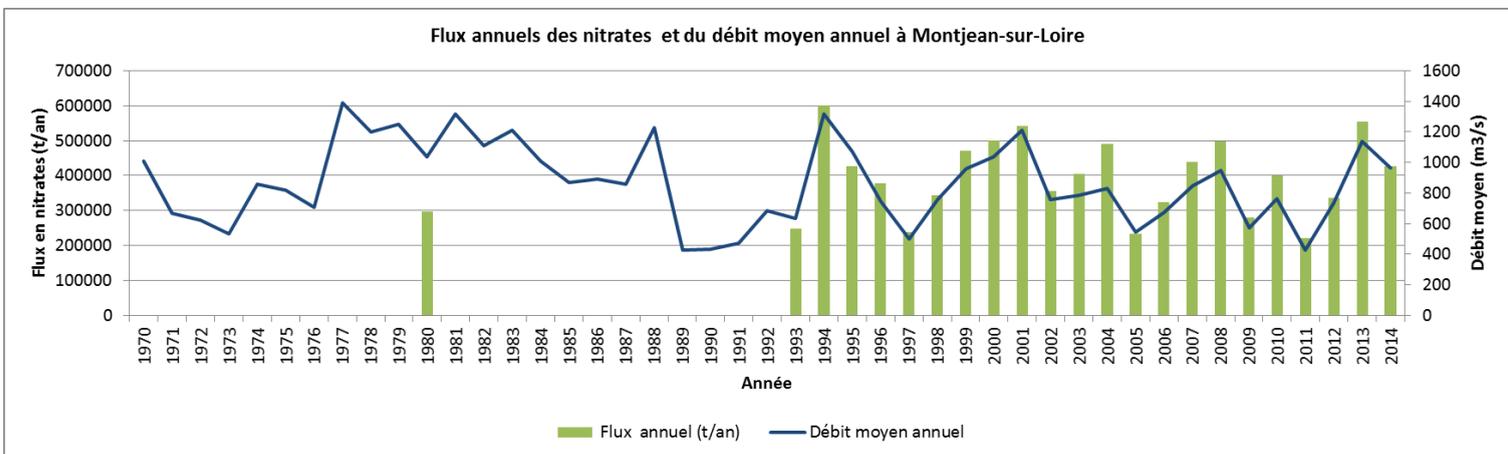
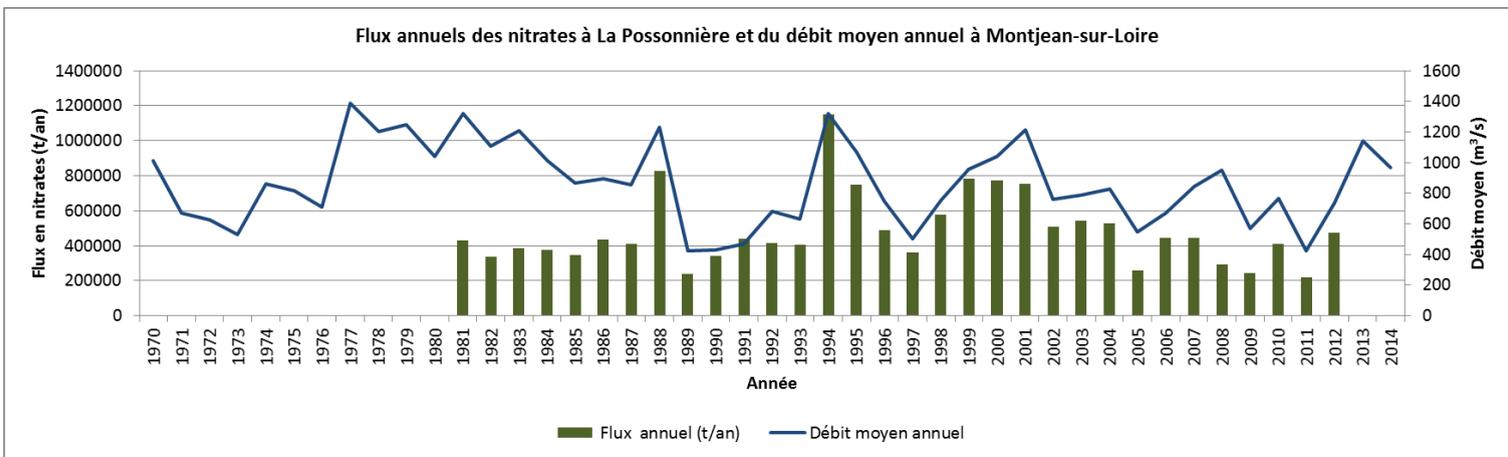
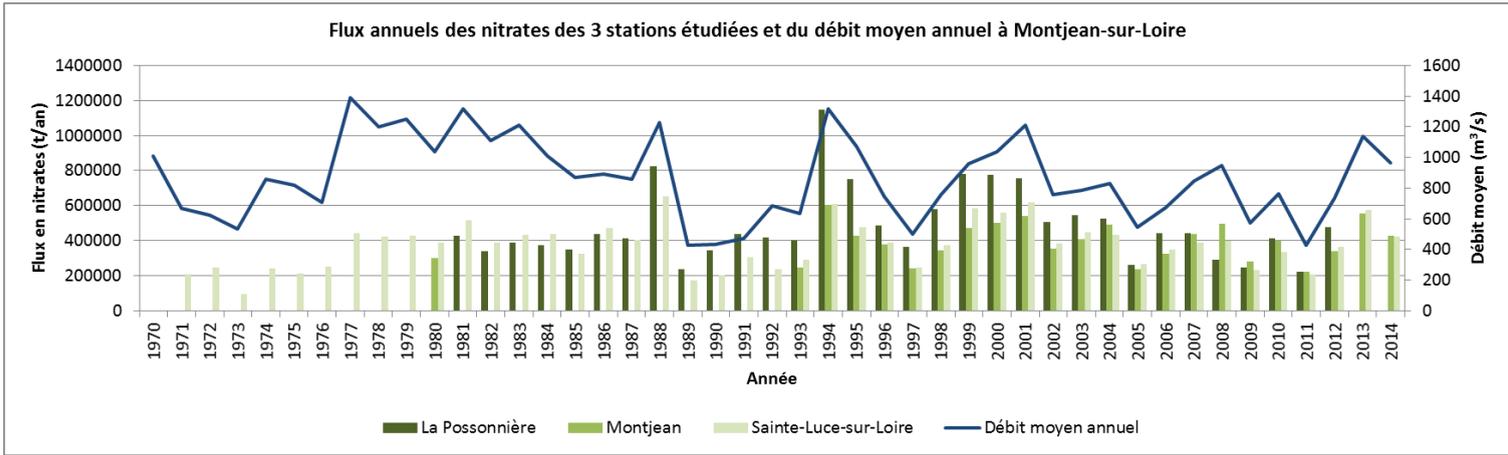
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates
à Cordemais de 1982 à 2014



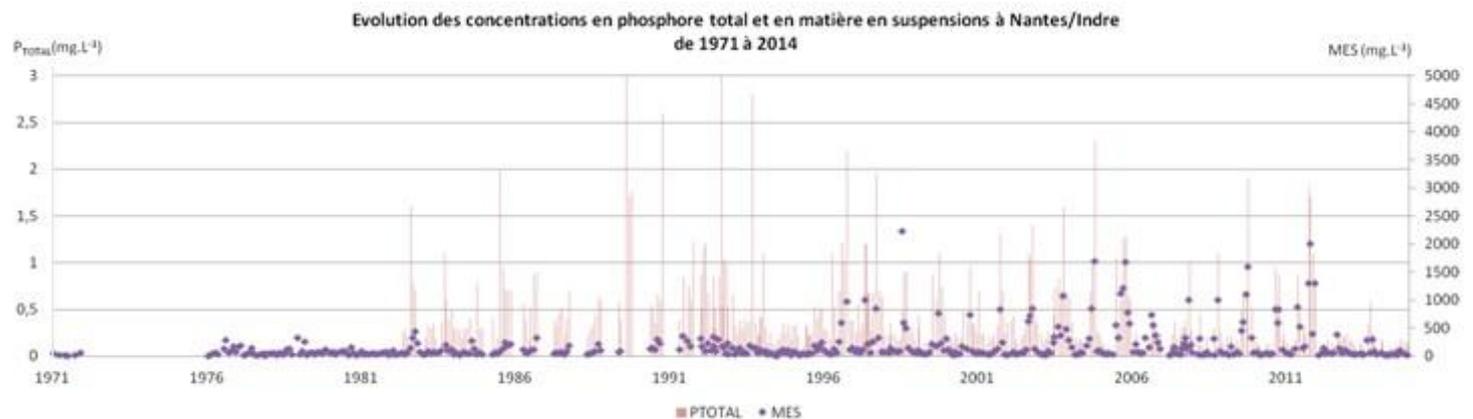
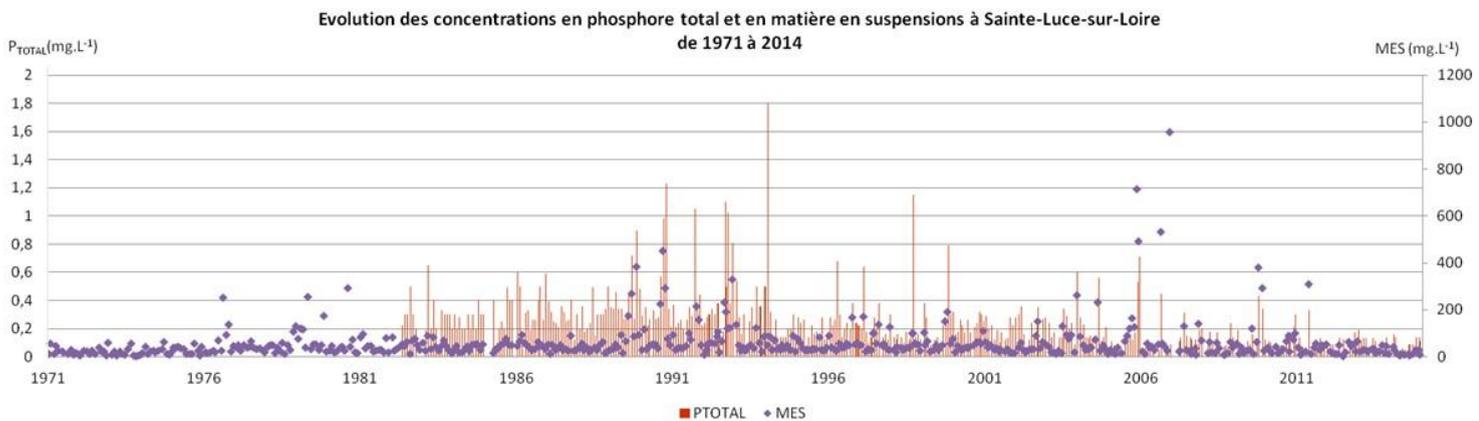
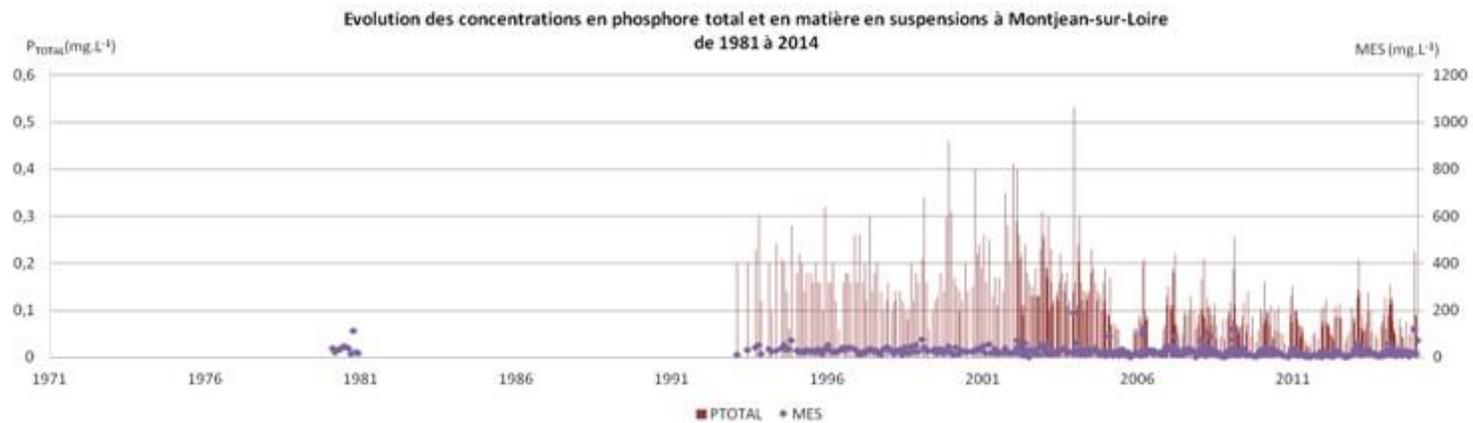
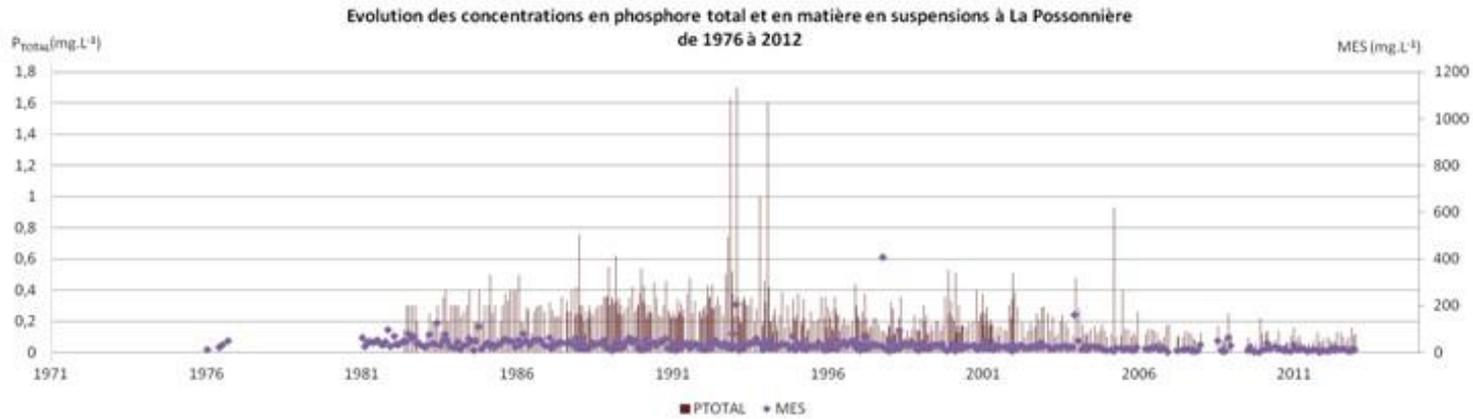
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en nitrates
à Saint-Nazaire/Mindin de 1993 à 2007



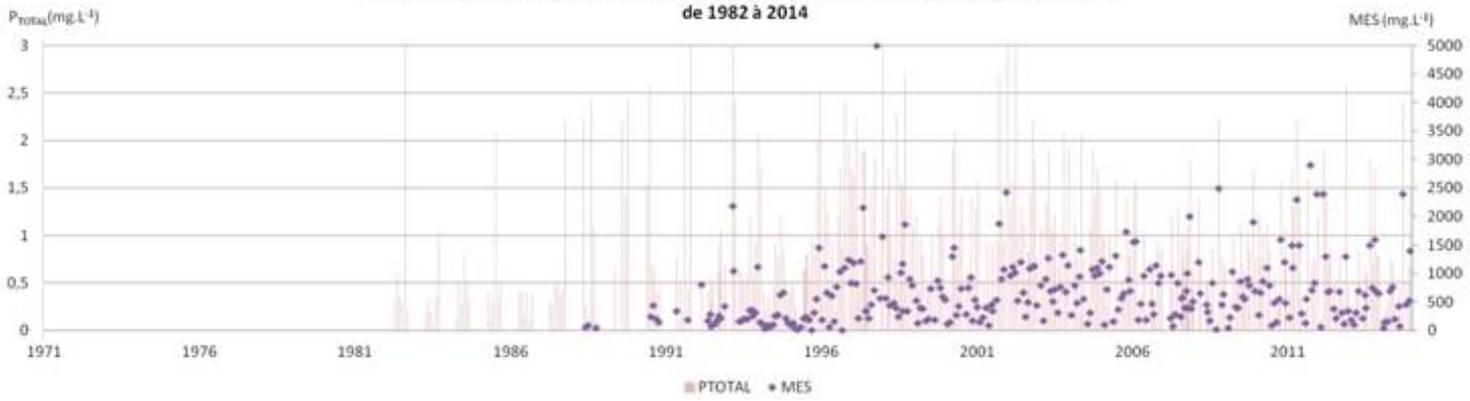
➤ Evolution des flux annuels en nitrates pour les 3 stations étudiées - Flux $F = C \times Q$ avec $C = \frac{\sum(Q_j \times C_j)}{\sum Q_j}$ (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)



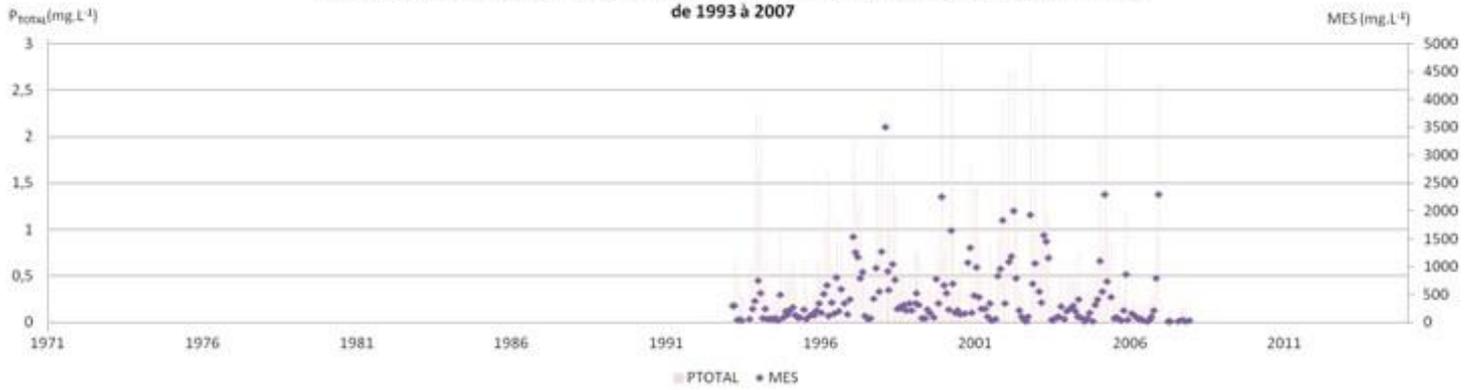
- Evolution des concentrations en phosphore total et des matières en suspension pour les stations étudiées (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, GIP Loire Estuaire)



Evolution des concentrations en phosphore total et en matière en suspensions à Cordemais de 1982 à 2014

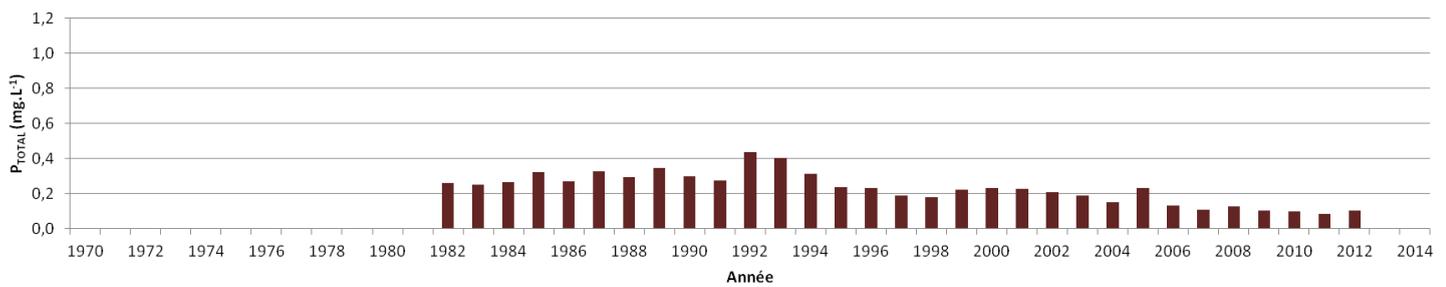


Evolution des concentrations en phosphore total et en matière en suspensions à Saint-Nazaire/Mindin de 1993 à 2007

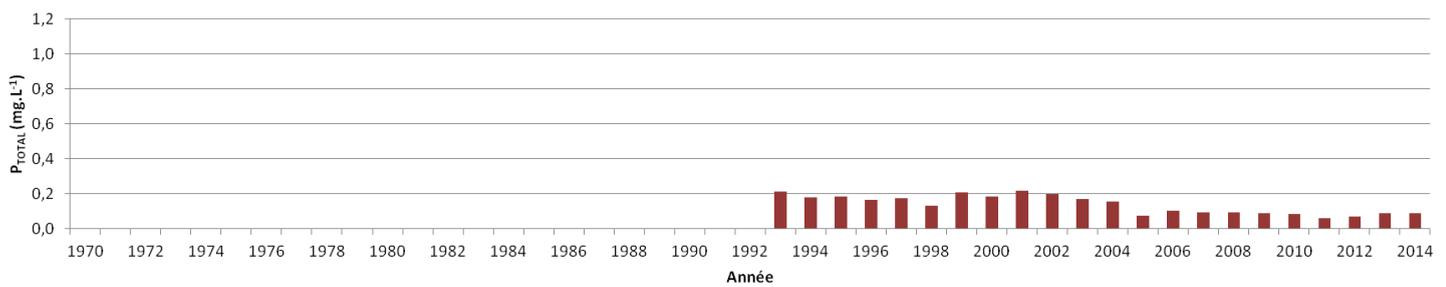


➤ Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total pour les 6 stations étudiées (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, GIP Loire Estuaire)

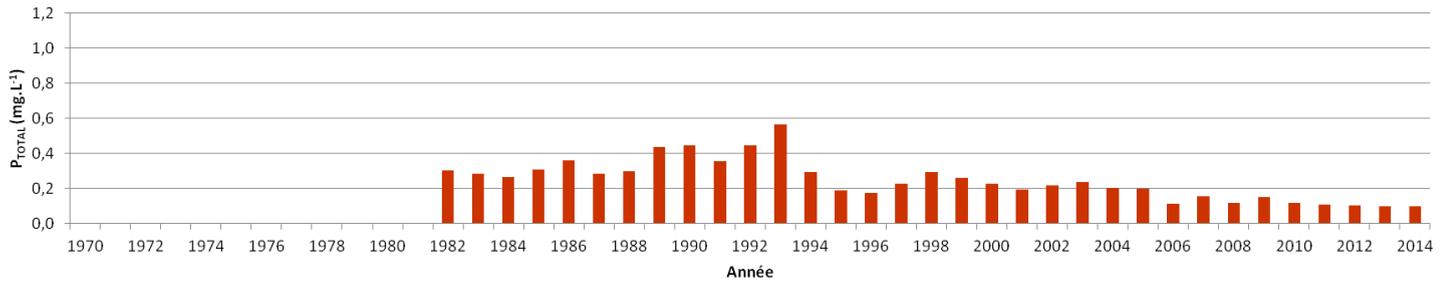
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total à La Possonnière de 1982 à 2012



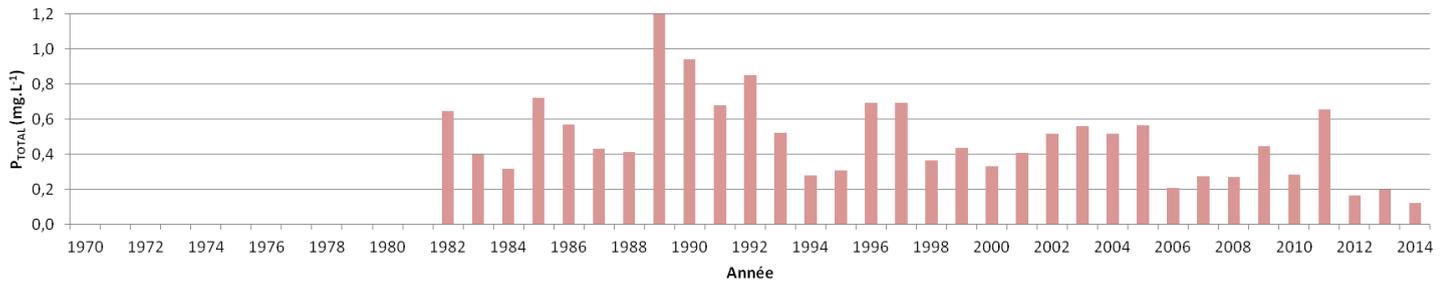
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total à Montjean de 1993 à 2014



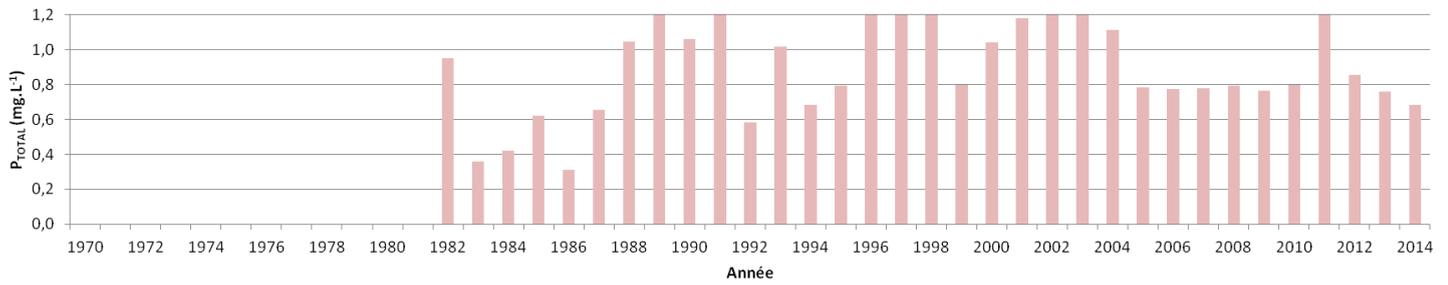
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total
à Sainte-Luce-sur-Loire de 1982 à 2014



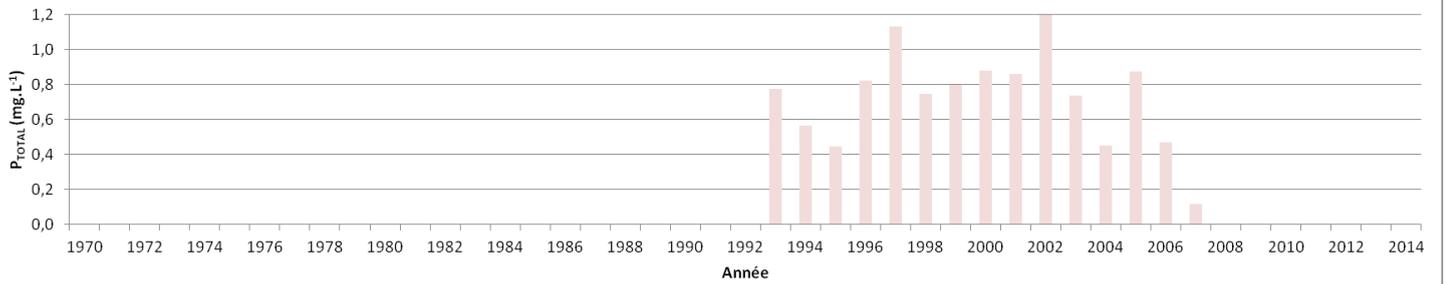
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total
à Nantes/Indre de 1982 à 2014



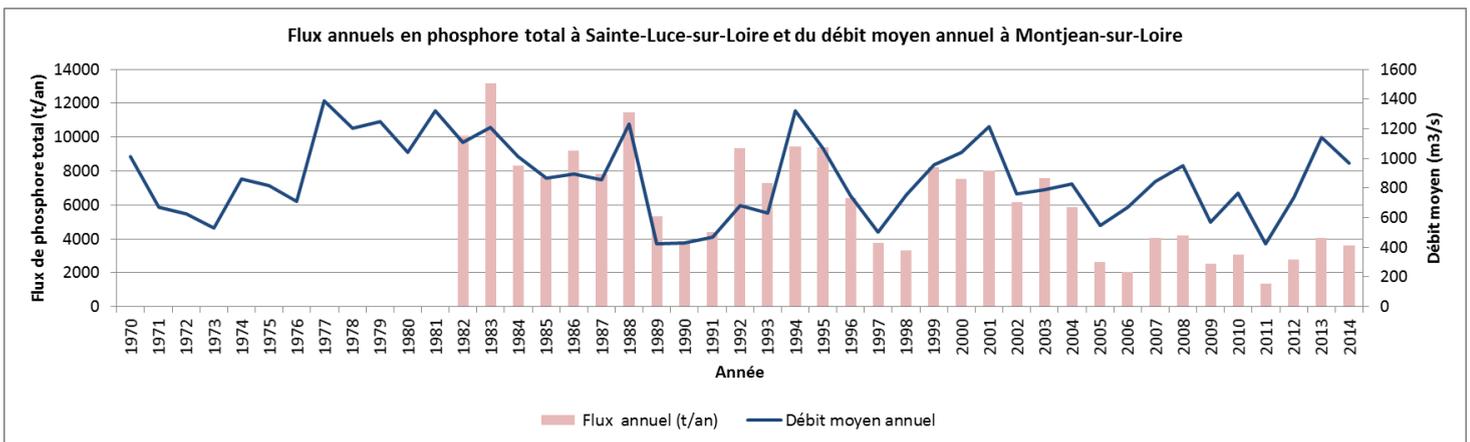
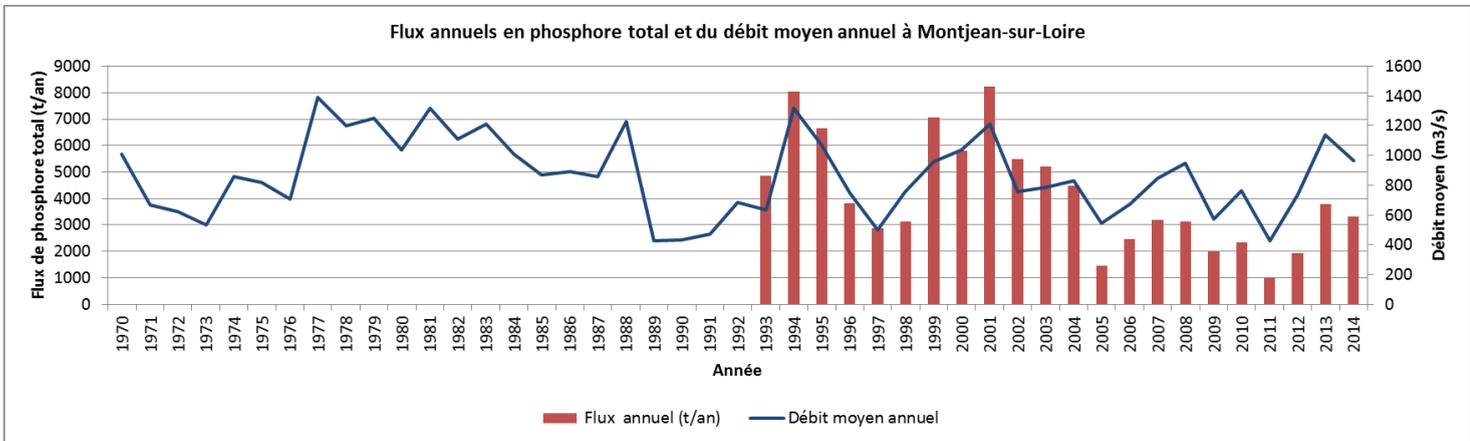
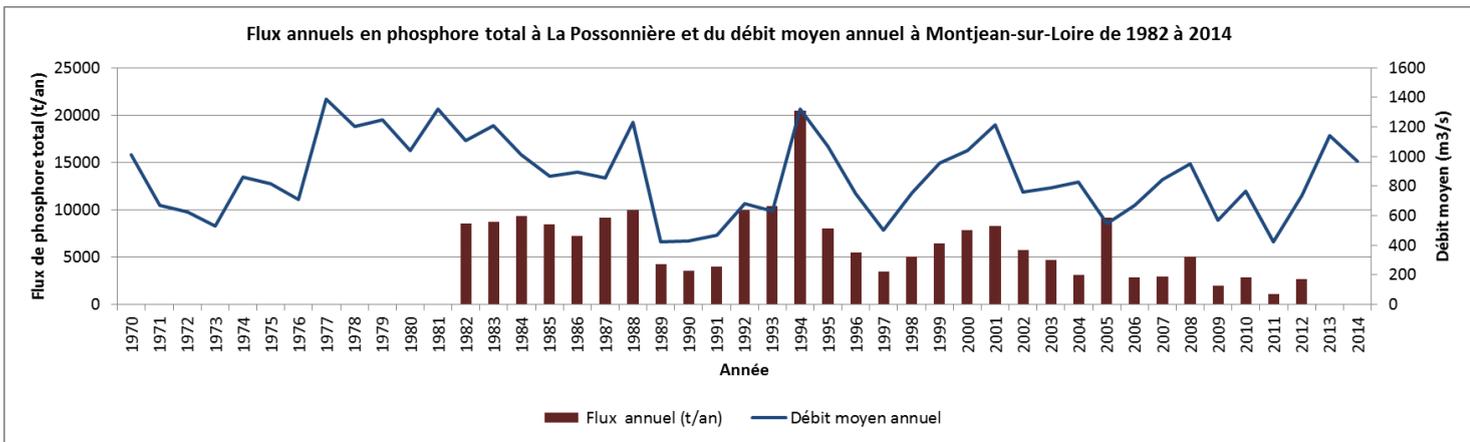
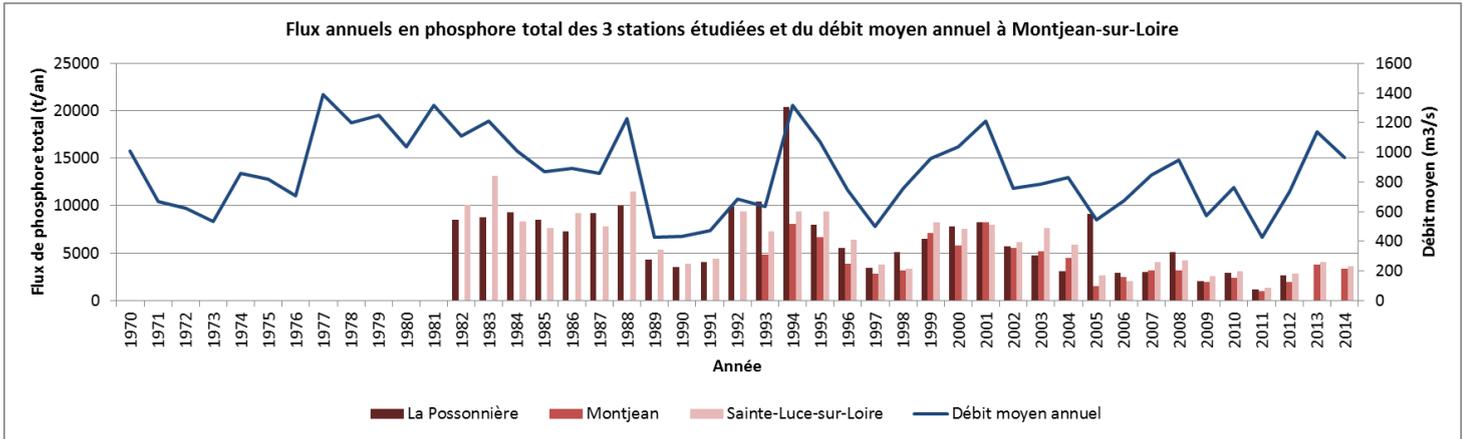
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total
à Cordemais de 1982 à 2014



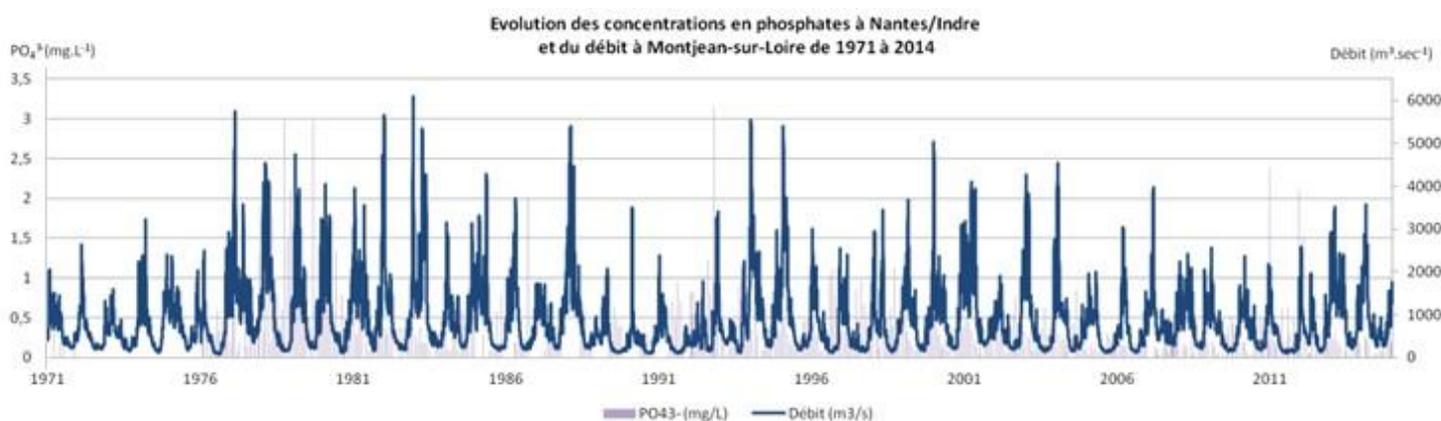
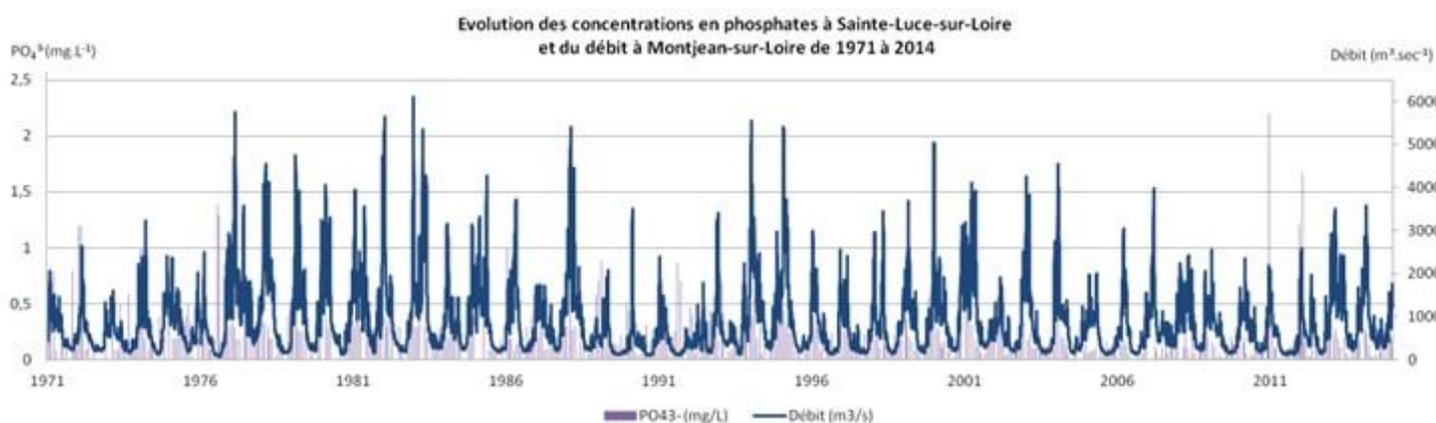
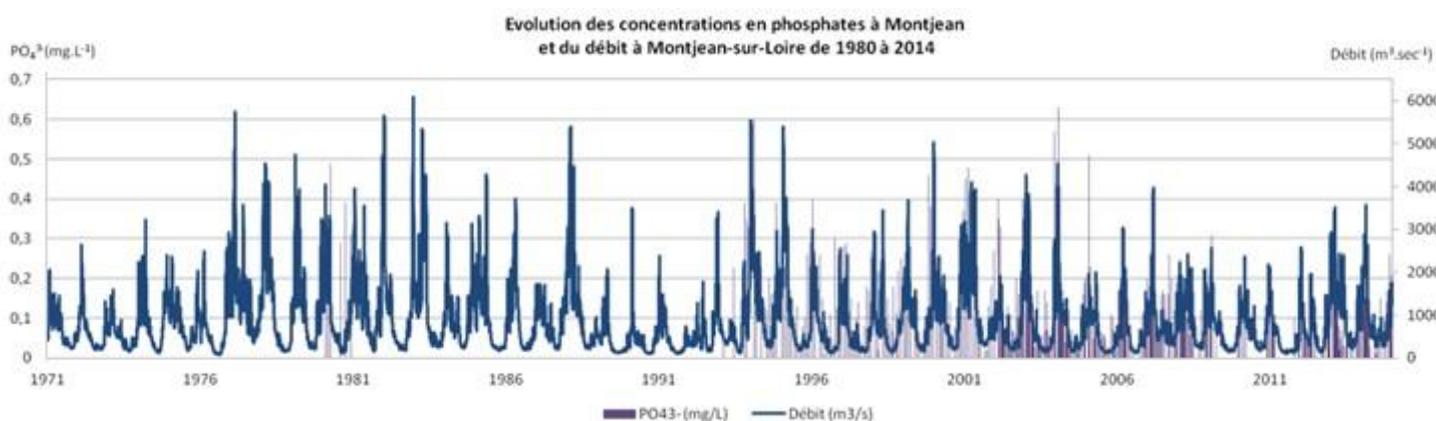
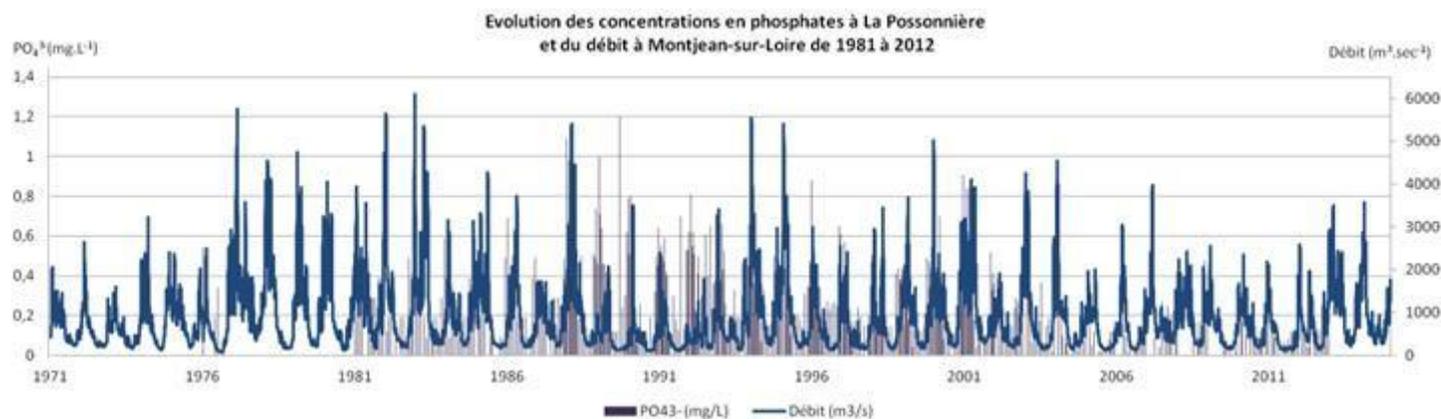
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphore total
à Saint-Nazaire/Mindin de 1993 à 2007

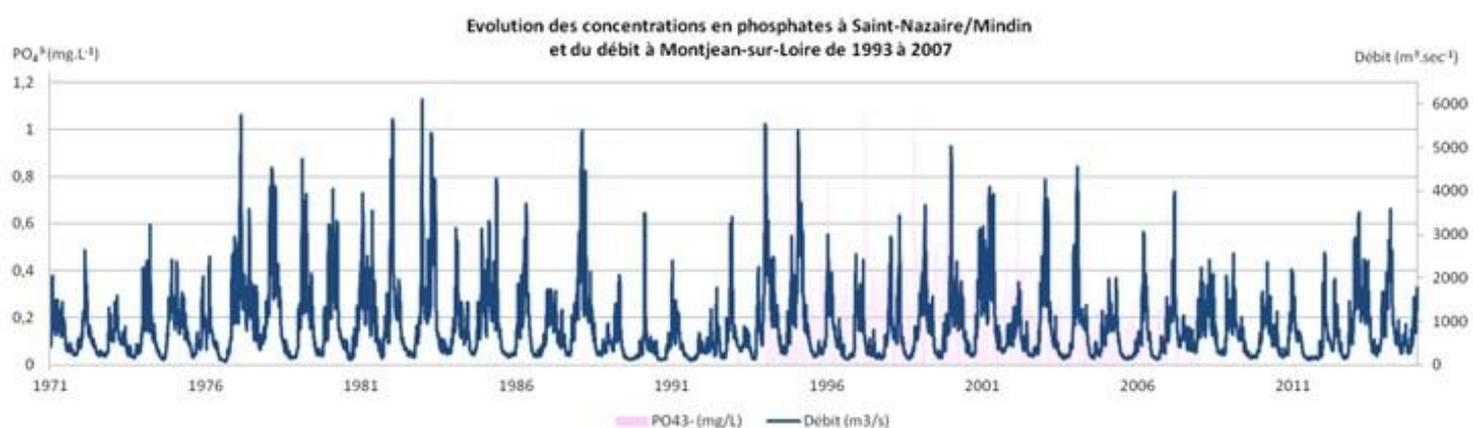
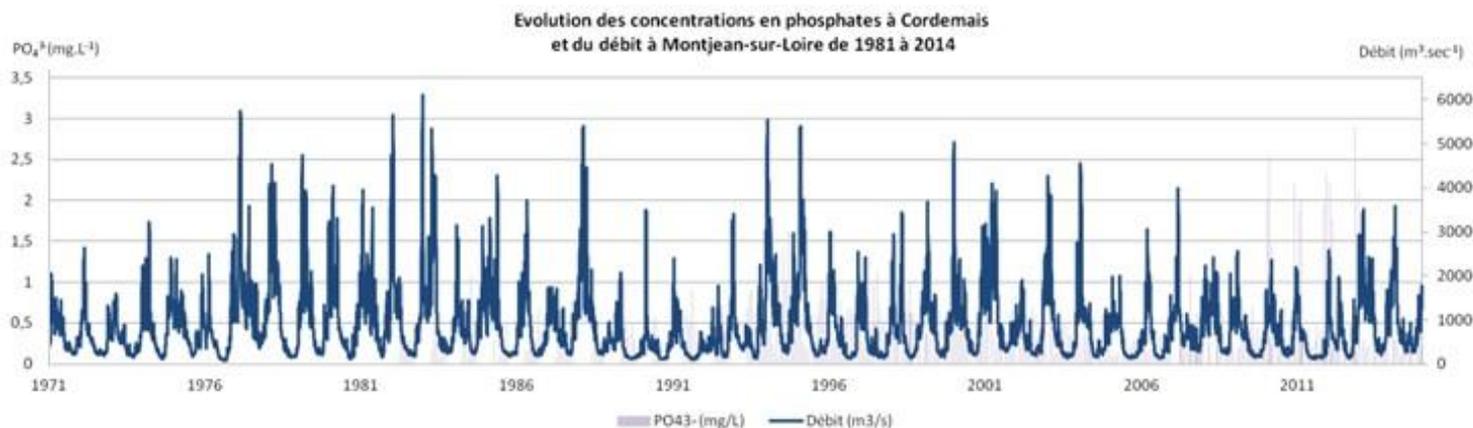


➤ Evolution des flux annuels en phosphore total pour les 3 stations étudiées - Flux $F = C \times Q$ avec $C = \frac{\sum(Q_j \times C_j)}{\sum Q_j}$
 (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)

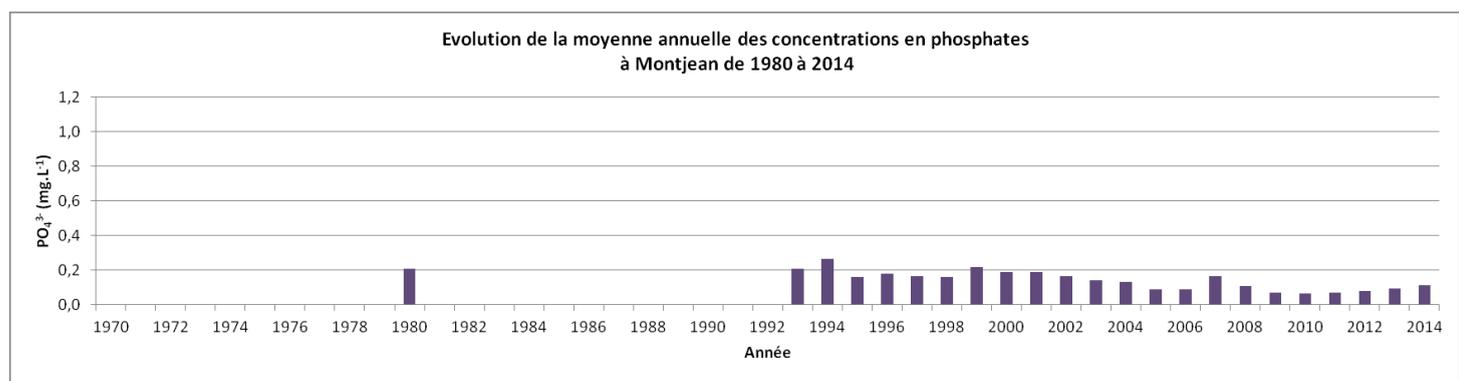
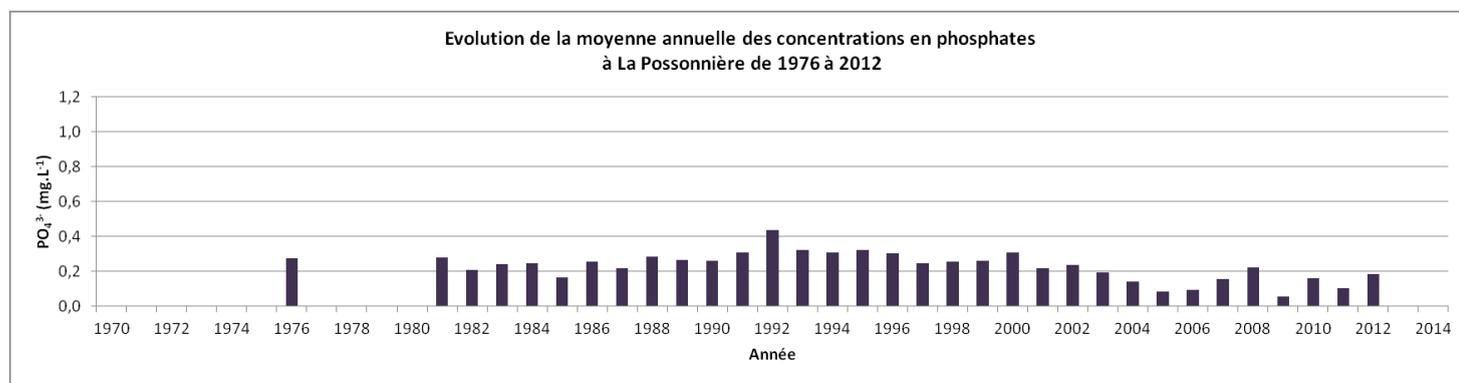


- Evolution des concentrations en phosphate et du débit à Montjean-sur-Loire pour les stations étudiées (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, GIP Loire Estuaire)

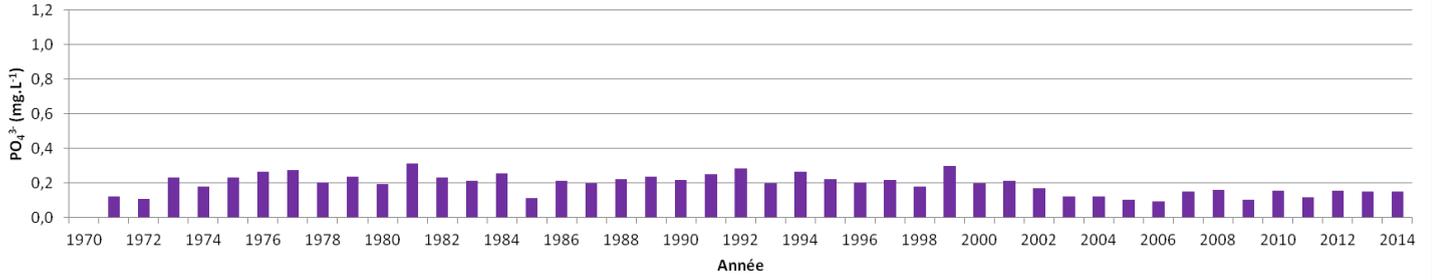




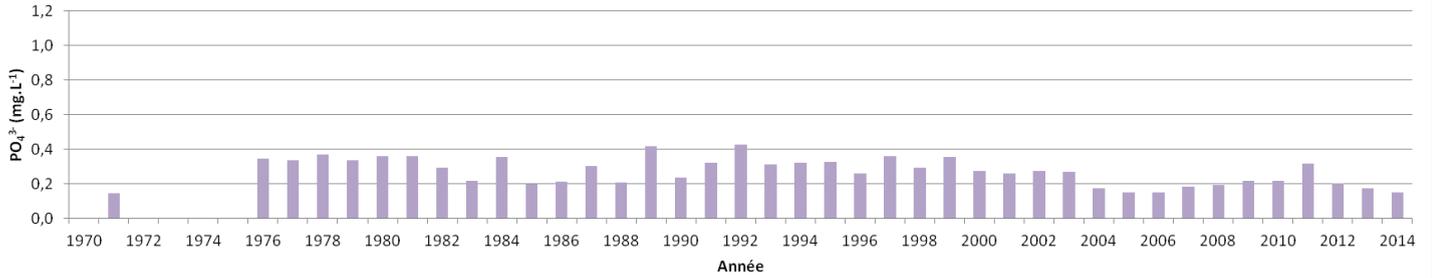
➤ *Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphates pour les 6 stations étudiées (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, GIP Loire Estuaire)*



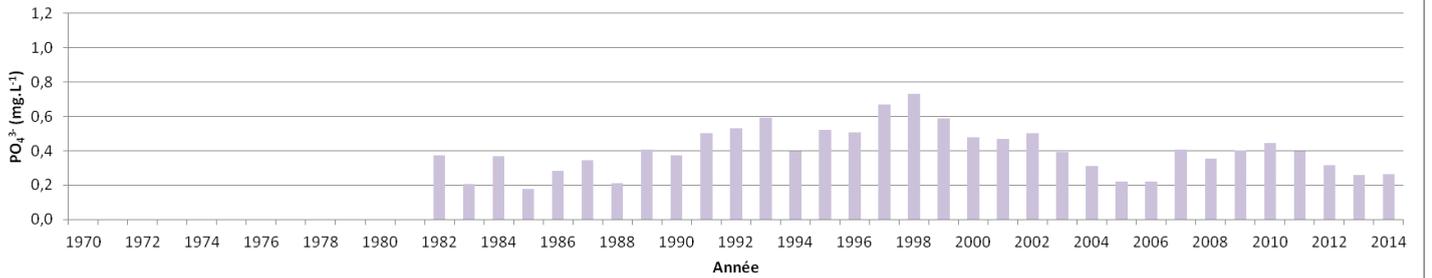
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphates
à Sainte-Luce-sur-Loire de 1971 à 2014



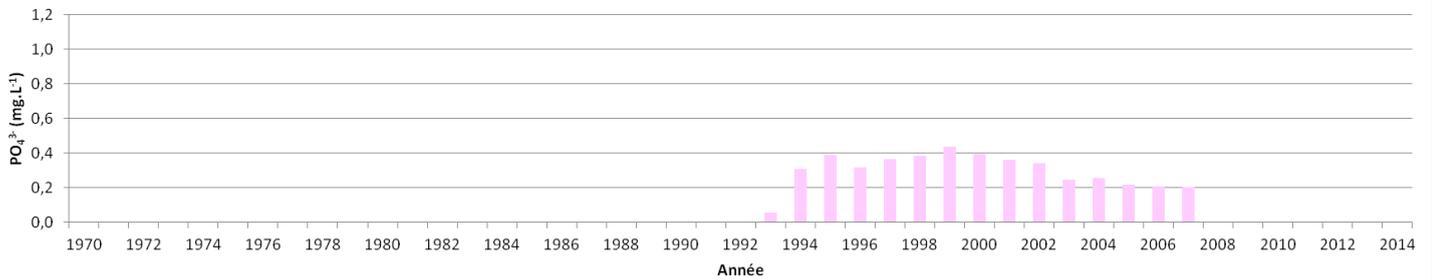
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphates
à Nantes/indre de 1971 à 2014



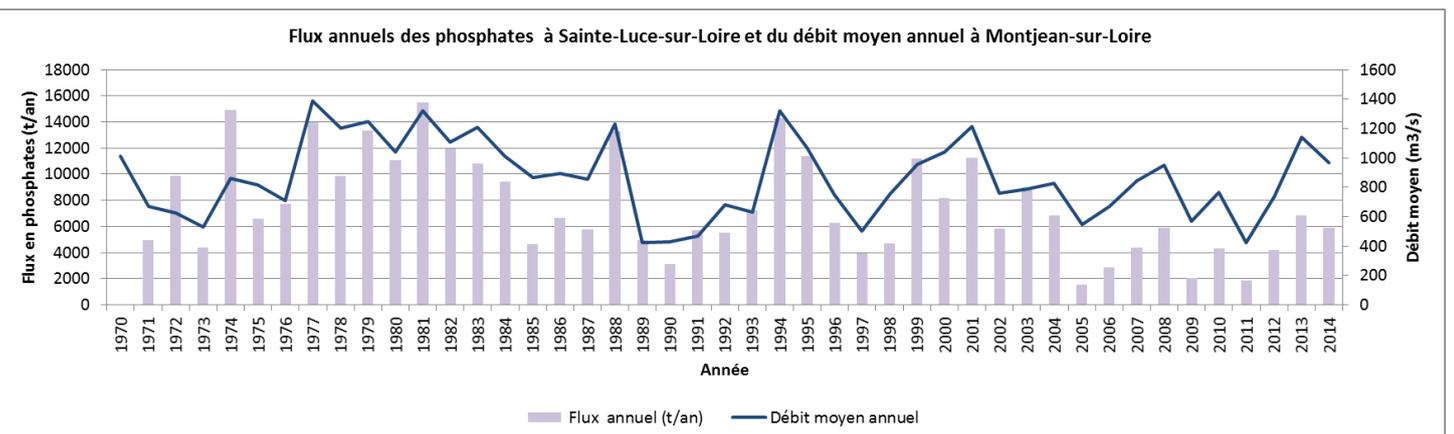
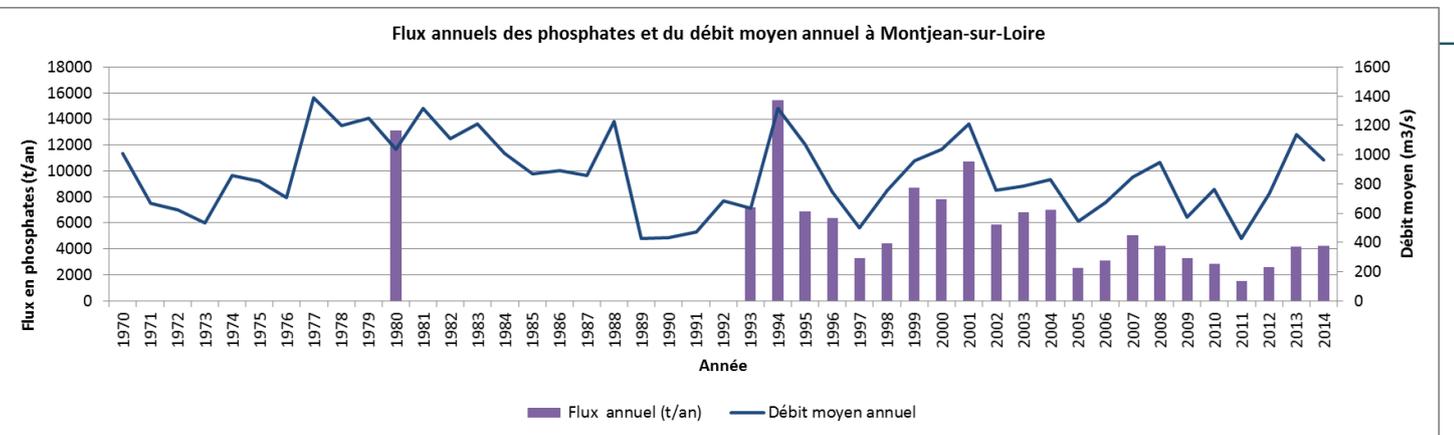
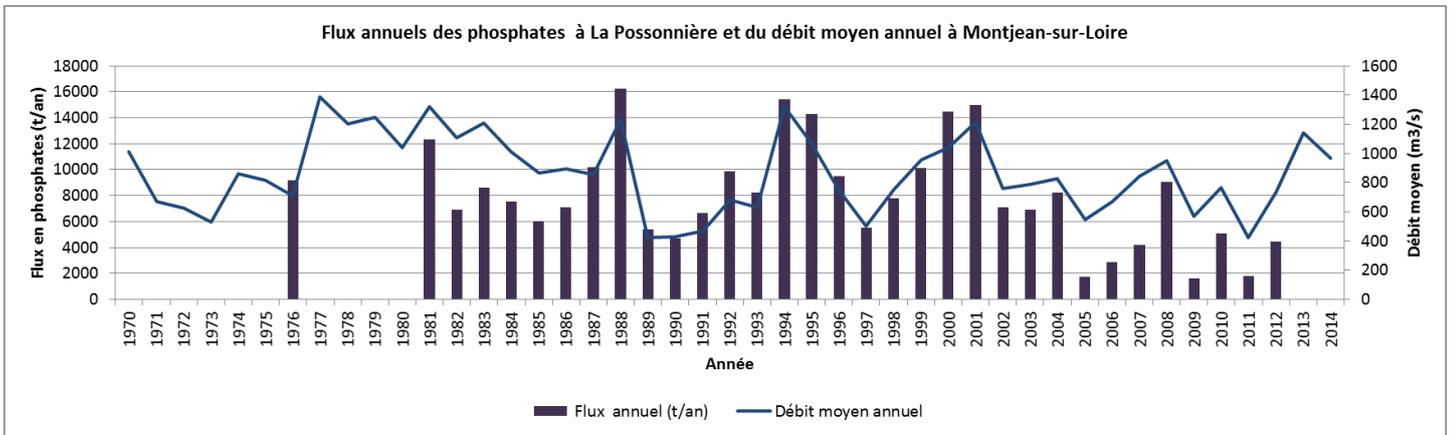
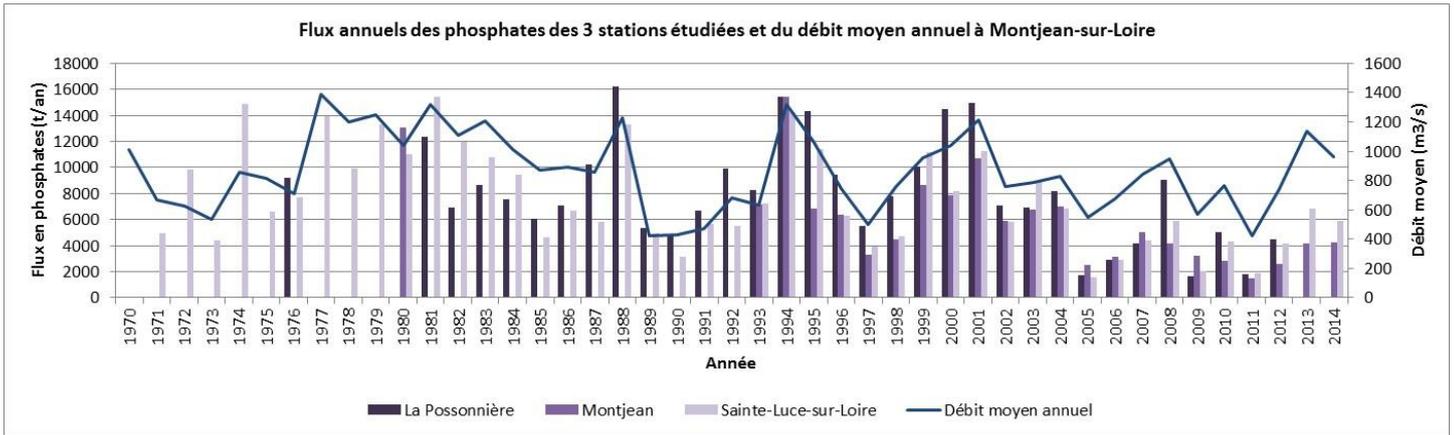
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphates
à Cordemais de 1982 à 2014



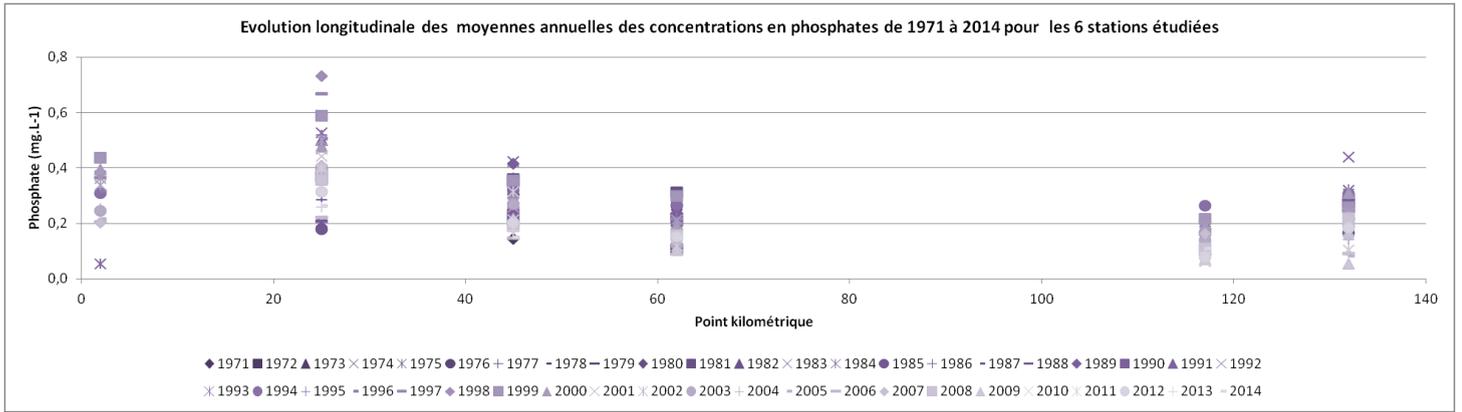
Evolution de la moyenne annuelle des concentrations en phosphates
à Saint-Nazaire/Mindin 1993 à 2007



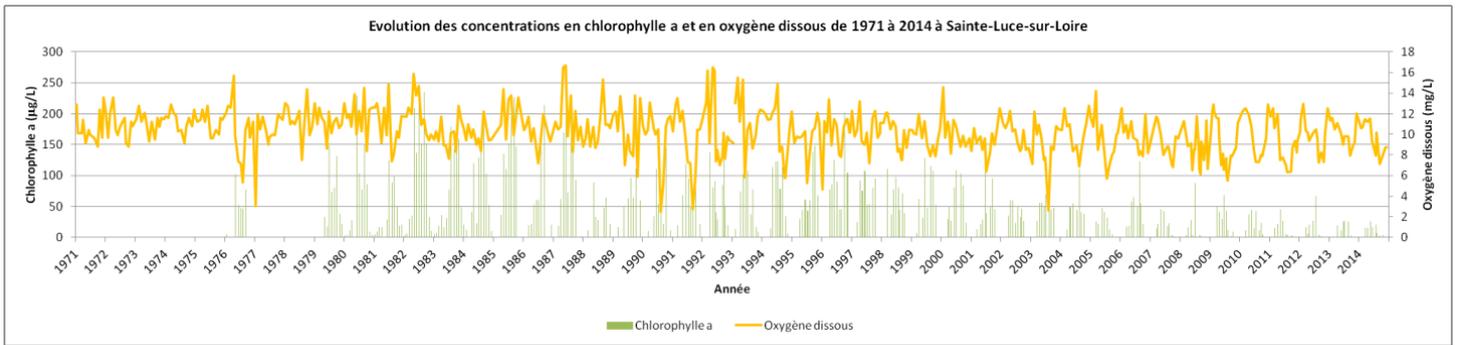
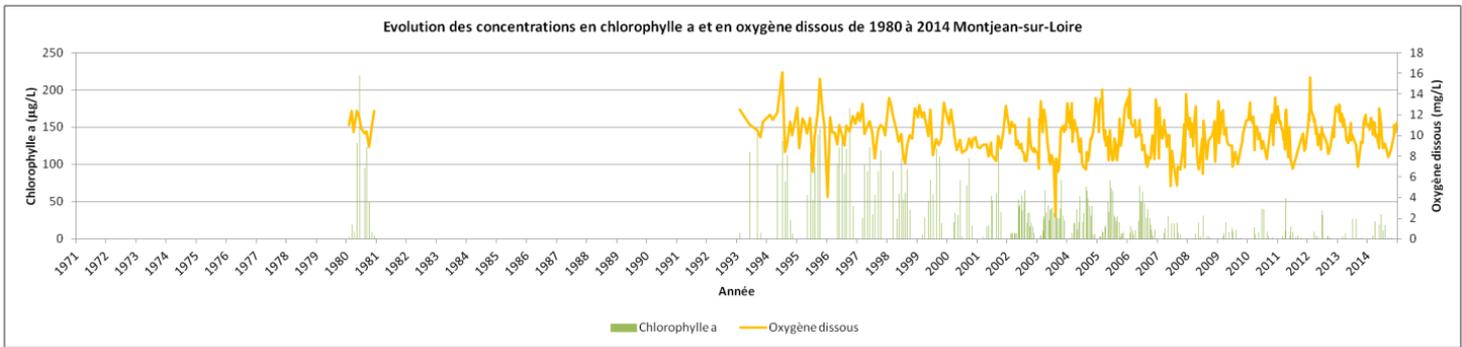
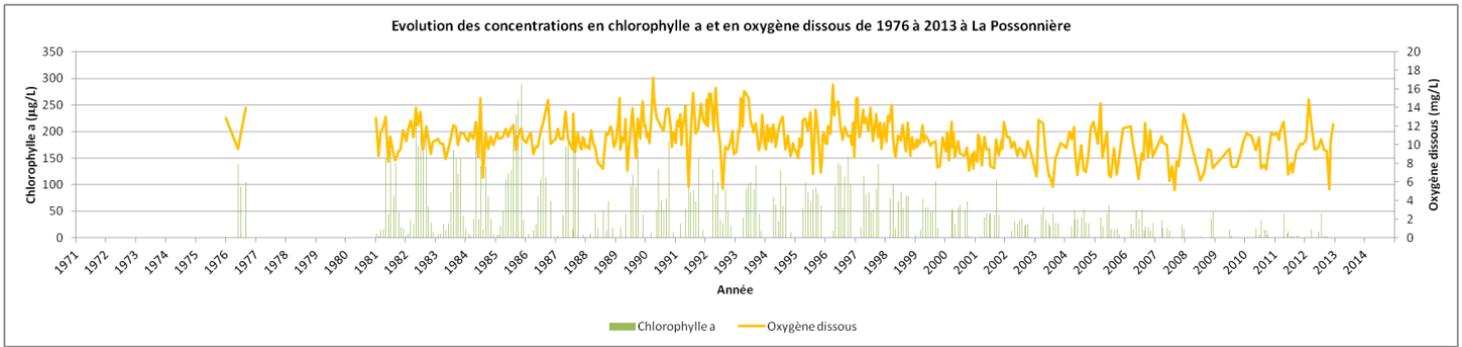
➤ Evolution des flux annuels en phosphates pour les 3 stations étudiées - Flux $F = C \times Q$ avec $C = \frac{\sum(Q_j \times C_j)}{\sum Q_j}$
 (sources : AELB, Département 44, DDTM 44, DREAL Pays de la Loire, GIP Loire Estuaire)

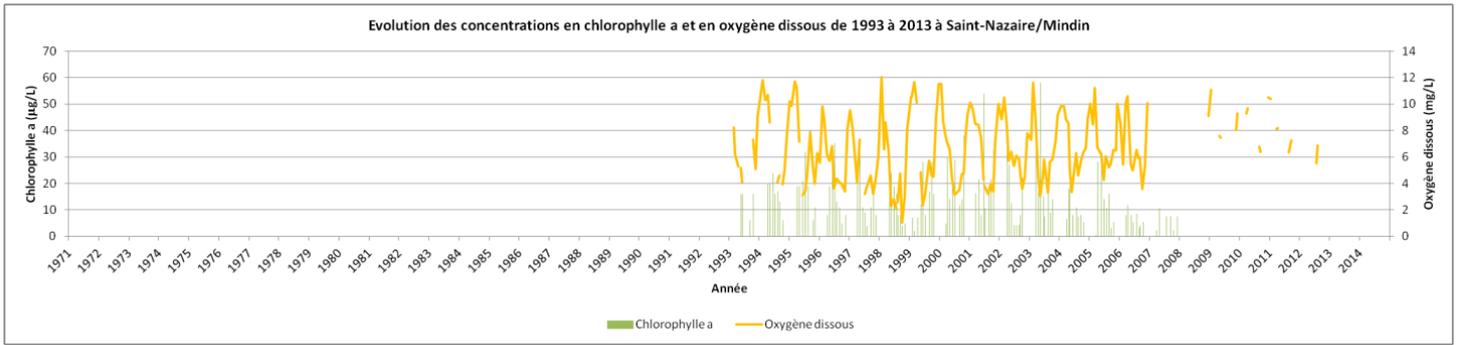
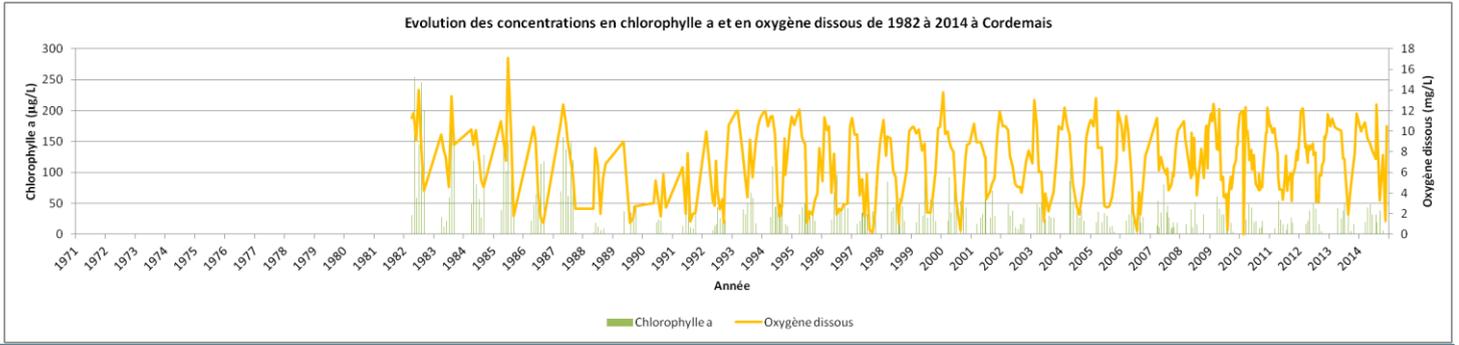
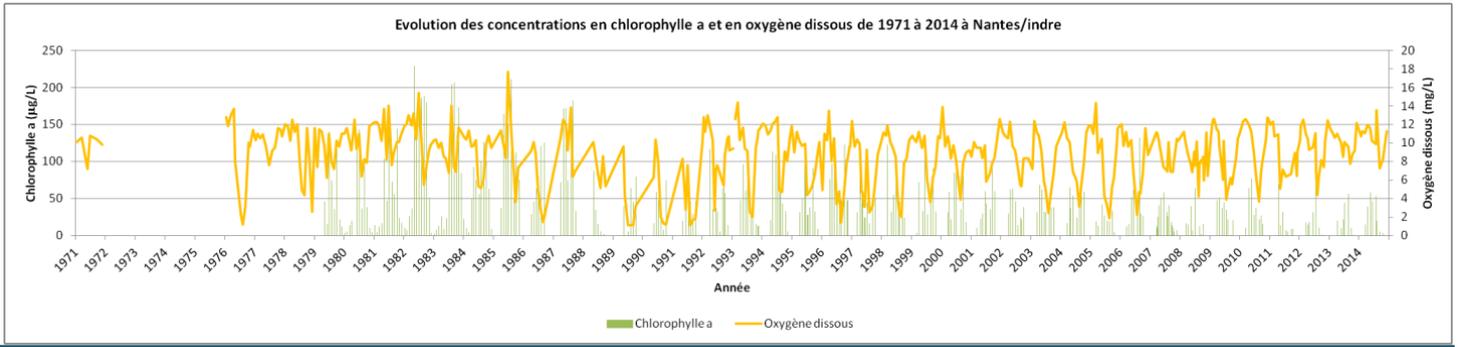


➤ *Evolution longitudinale des moyennes annuelles des concentrations en phosphates pour les 6 stations étudiées (sources : AELB, Département 44, DDTM44, GIP Loire Estuaire)*



➤ *Evolution des concentrations en chlorophylle a et en oxygène dissous pour les 6 stations étudiées (sources : AELB, Département 44, DDTM44, Météo-France, GIP Loire Estuaire)*

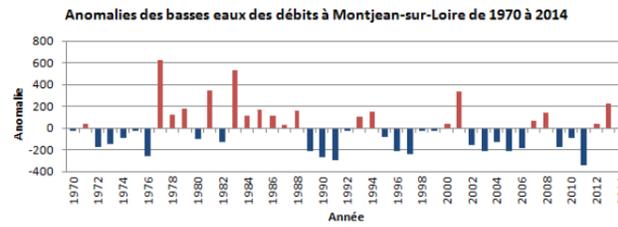




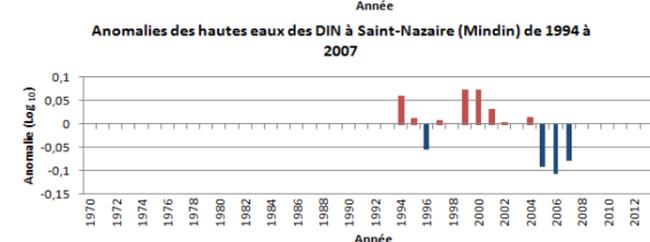
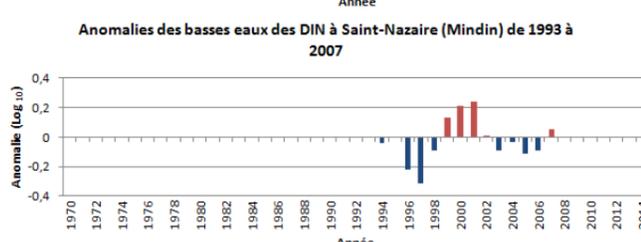
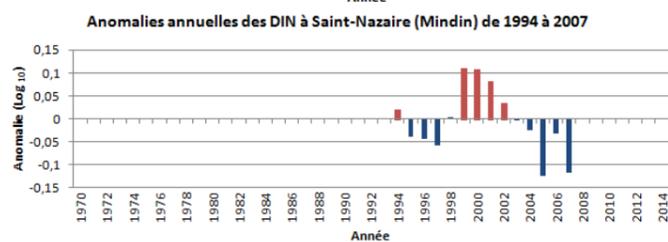
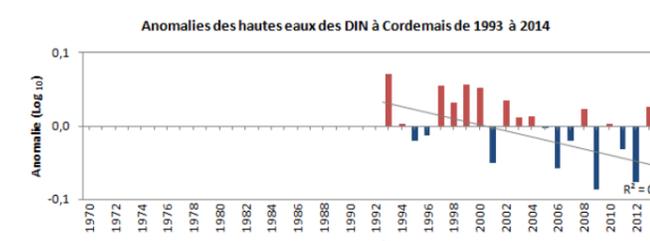
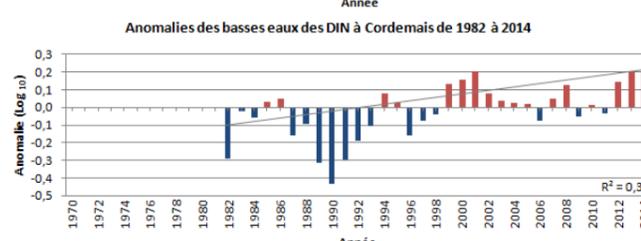
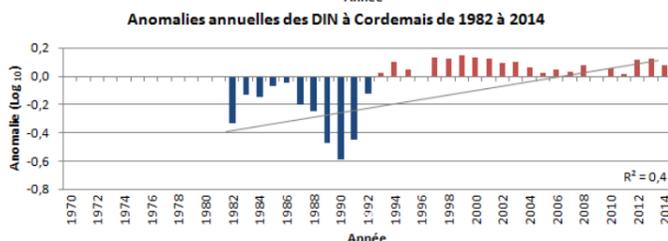
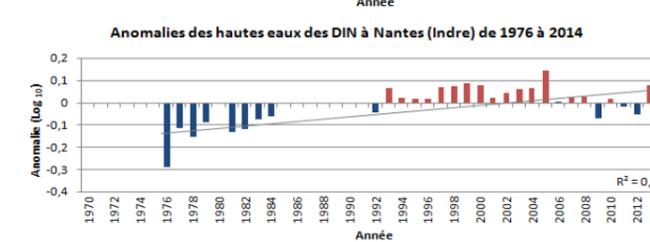
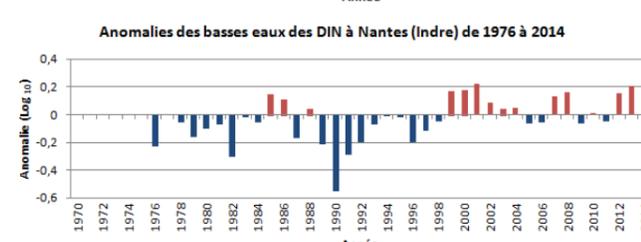
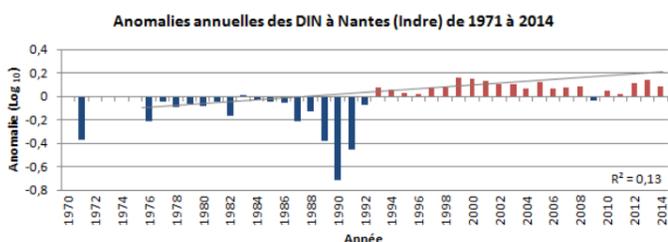
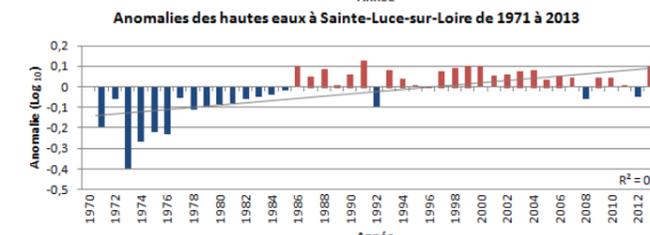
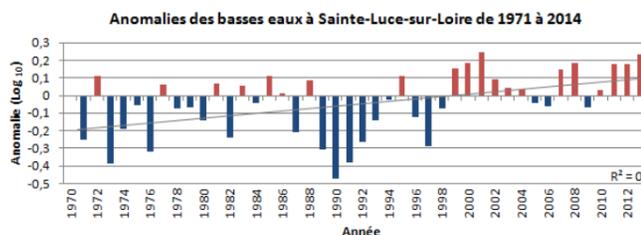
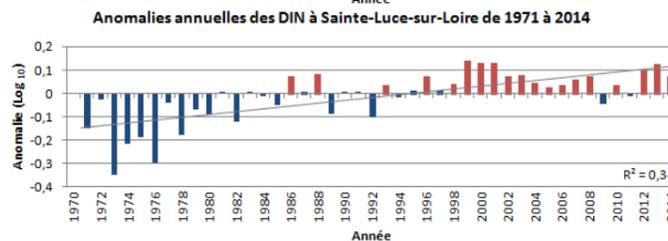
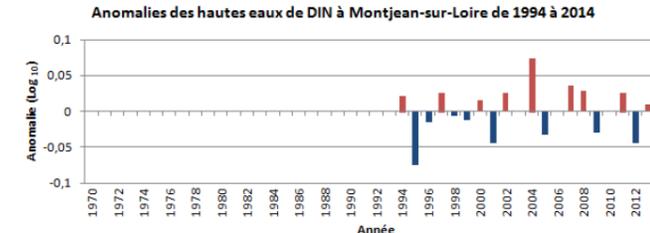
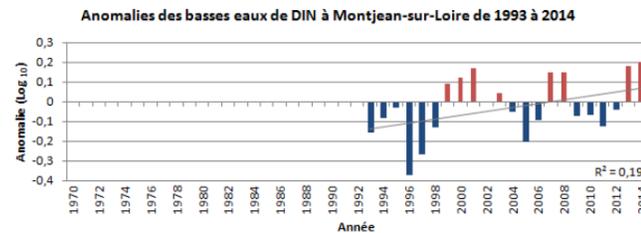
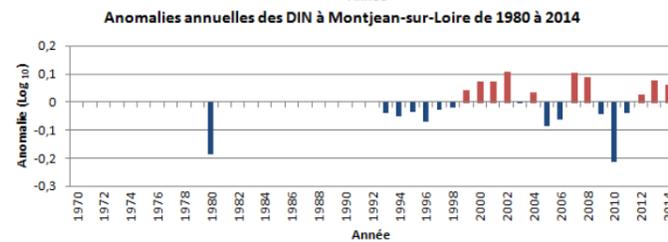
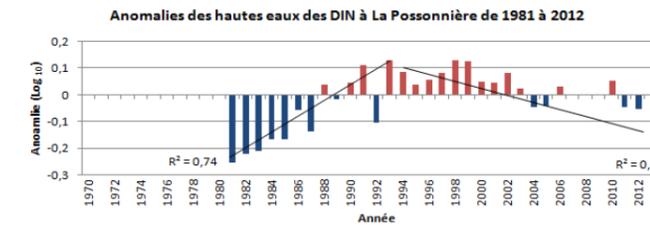
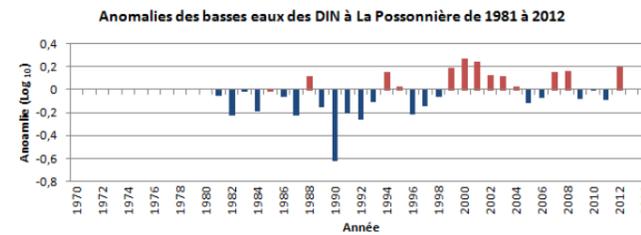
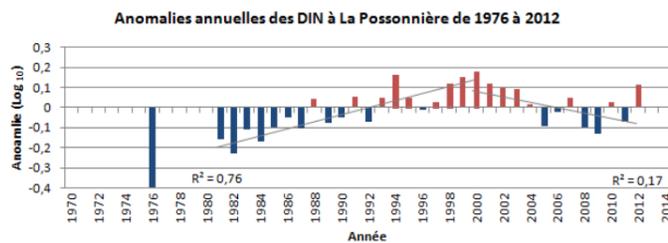
Annexe 7: Synthèse des résultats obtenus par la méthode des anomalies, T.D O'Brien (2012)

- **Page 1** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour l'azote inorganique dissous ou « dissolved inorganic nitrogen » DIN pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 2** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour l'azote inorganique dissous ou « dissolved inorganic nitrogen » DIN pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « hivernale ».
- **Page 3** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les nitrates (NO_3^-) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 4** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les nitrates (NO_3^-) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « hivernale ».
- **Page 5** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les nitrites (NO_2^-) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 6** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les nitrites (NO_2^-) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « hivernale ».
- **Page 7** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour l'ammonium (NH_4^+) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 8** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour l'ammonium (NH_4^+) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « hivernale ».
- **Page 9** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les phosphates (PO_4^{3-}) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 10** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les phosphates (PO_4^{3-}) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « hivernale ».
- **Page 11** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les silicates (Si(OH)_4) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 12** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les silicates (Si(OH)_4) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « hivernale ».
- **Page 13** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour la chlorophylle a (chlo a) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 14** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour la chlorophylle a (chlo a) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « printanière ».
- **Page 15** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les phéopigments (phe) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 16** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour les phéopigments (phe) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « hivernale ».
- **Page 17** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour la température ($^{\circ}\text{C}$) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « basses eaux » / « hautes eaux ».
- **Page 18** : Synthèse des résultats d'anomalies selon la méthodologie O'Brien (2012) pour la température ($^{\circ}\text{C}$) pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire – Période « estivale » / « hivernale ».

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire



- Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6)



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status— Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

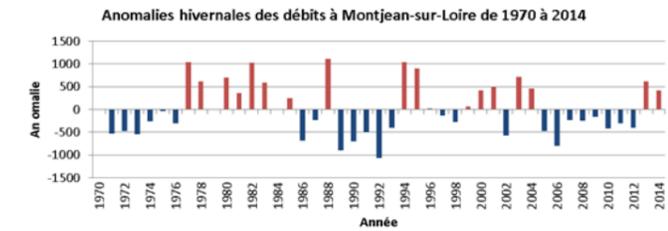
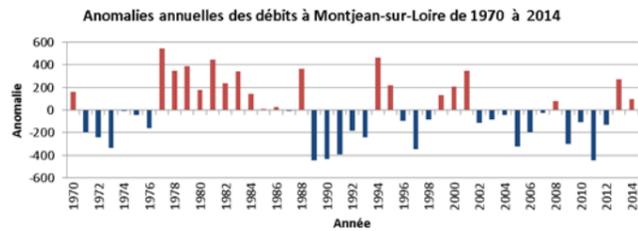
« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

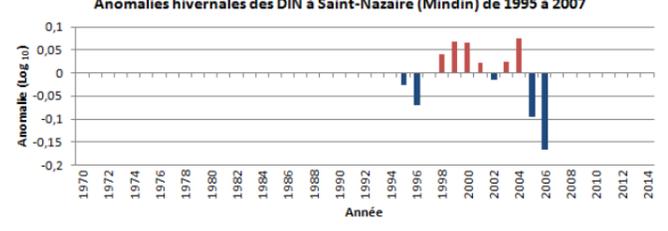
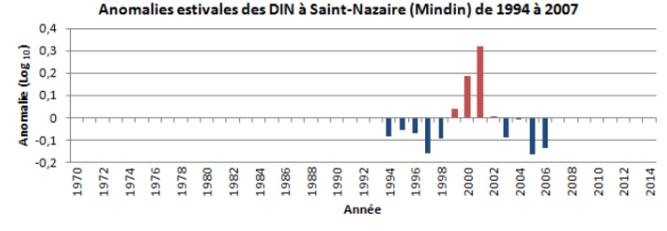
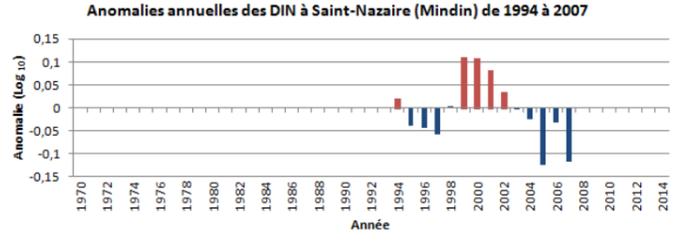
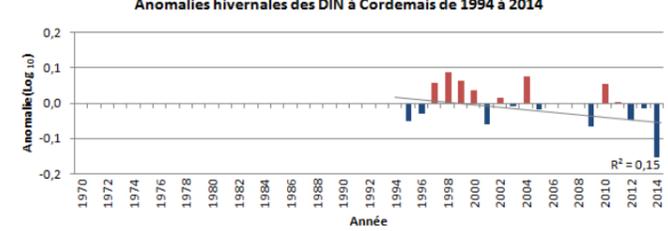
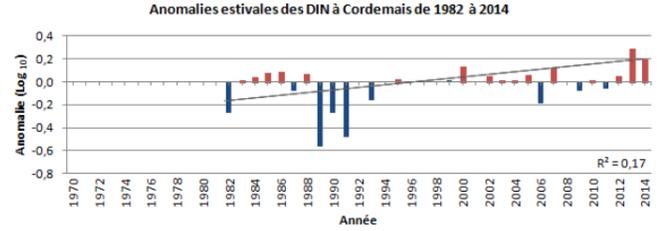
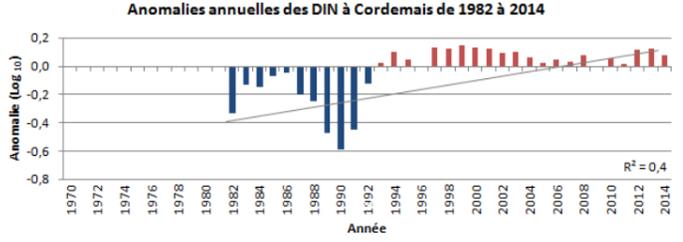
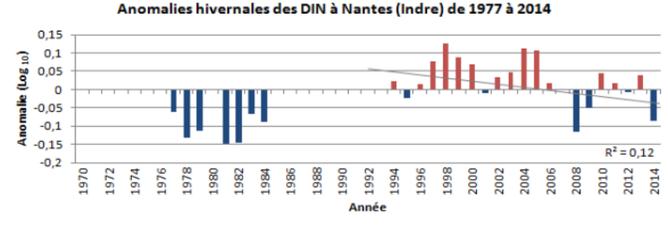
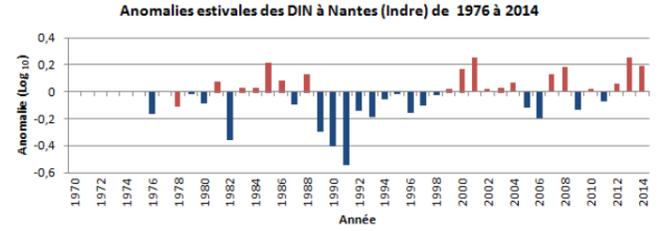
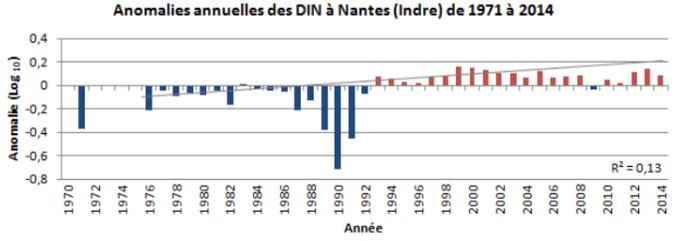
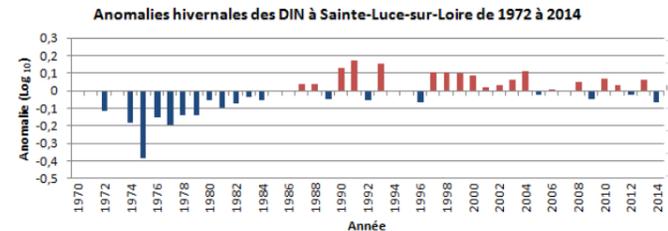
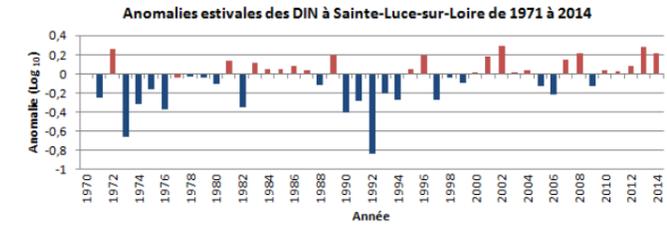
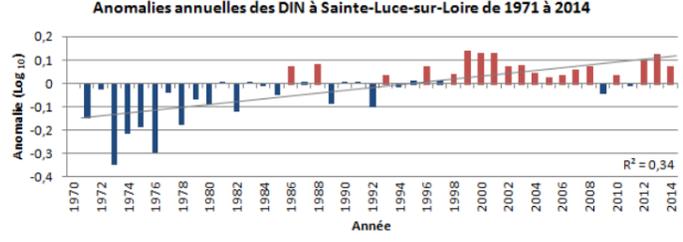
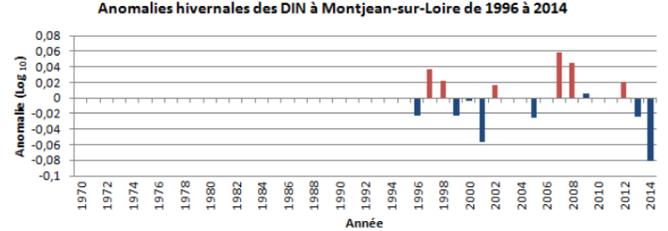
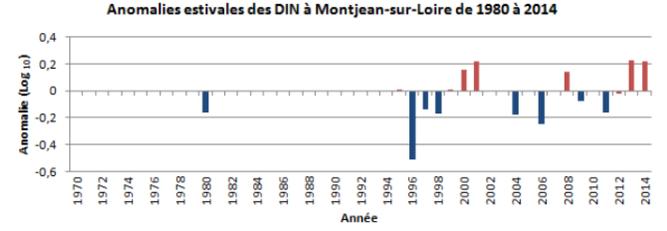
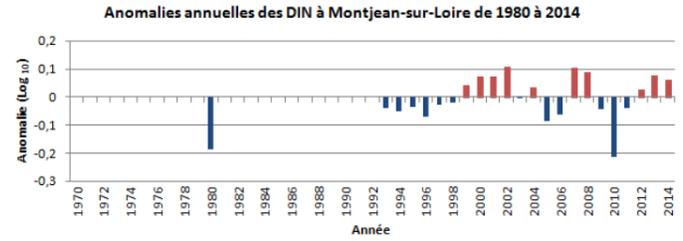
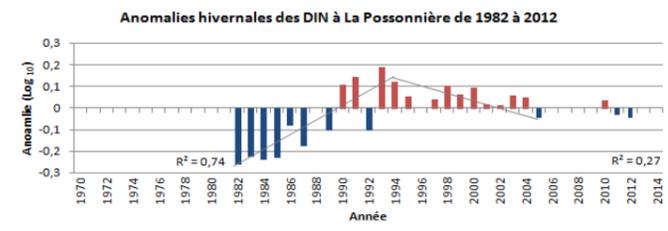
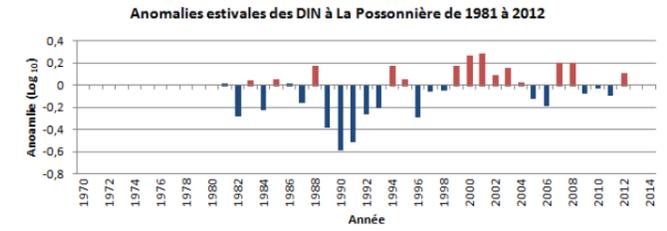
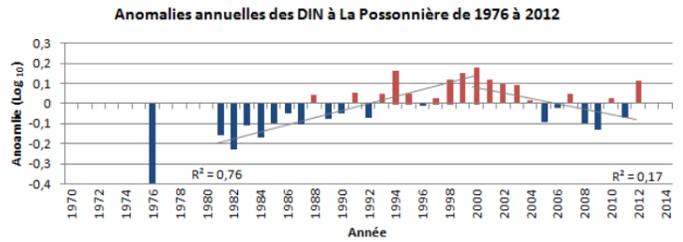
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire



- Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et hivernale (3 mois) pour le DIN exprimé en $\mu\text{mol/L}$



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 »

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année

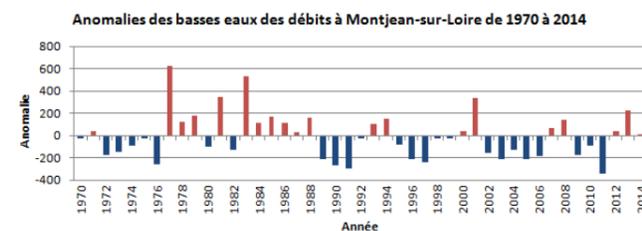
« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

« saison hivernale » : Période de 3 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de décembre à février. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

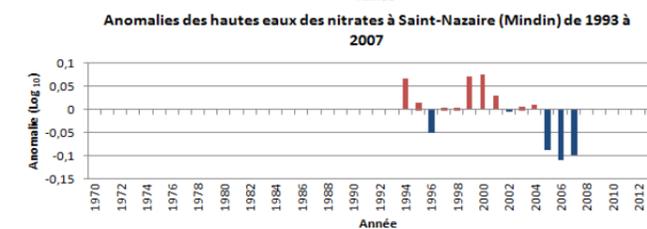
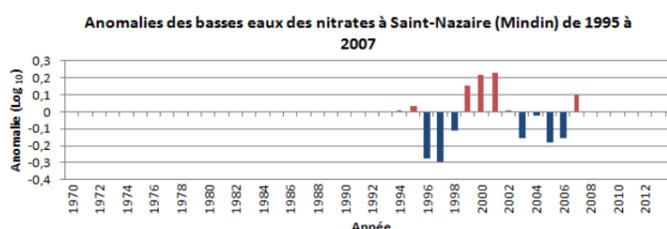
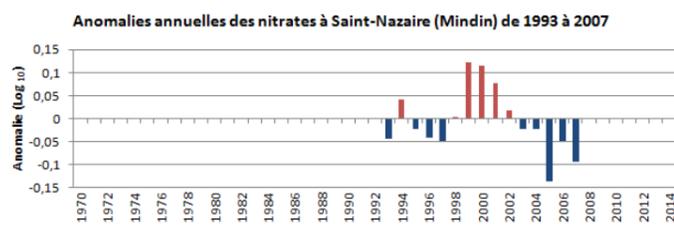
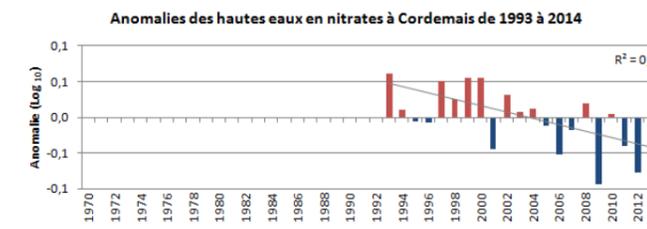
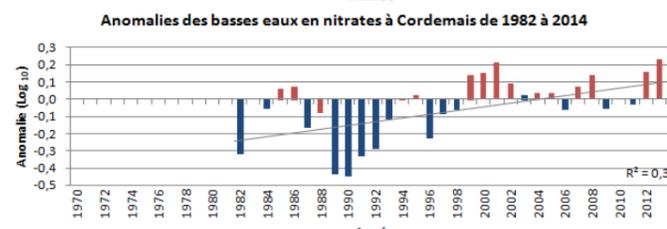
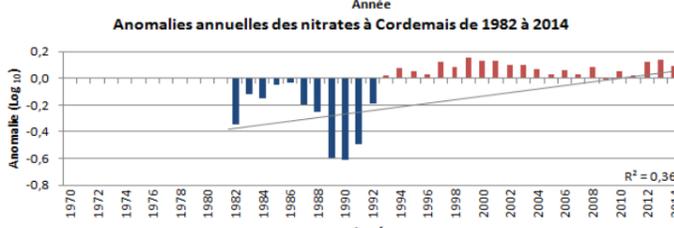
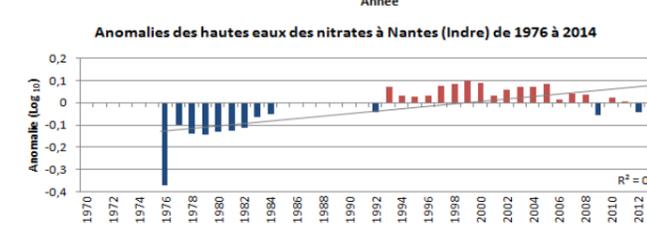
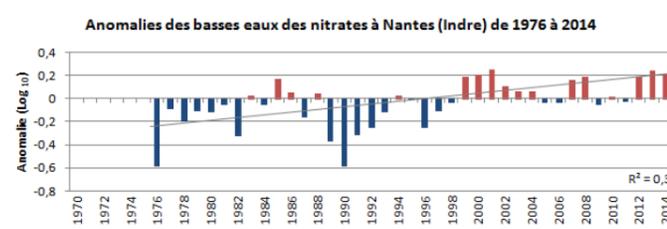
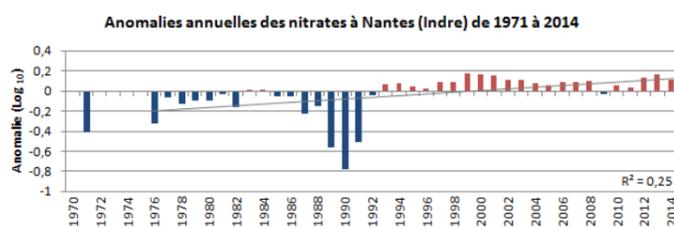
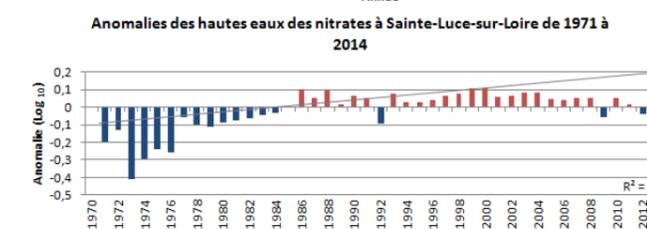
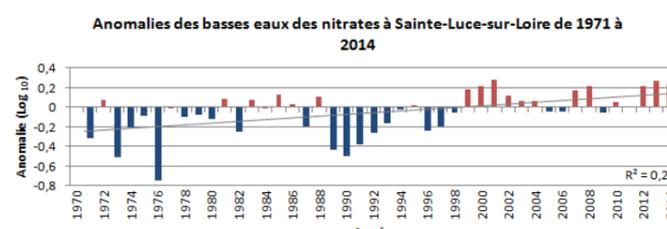
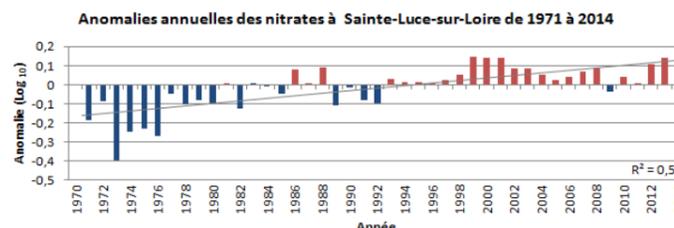
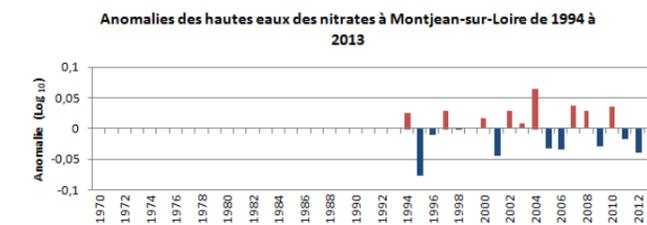
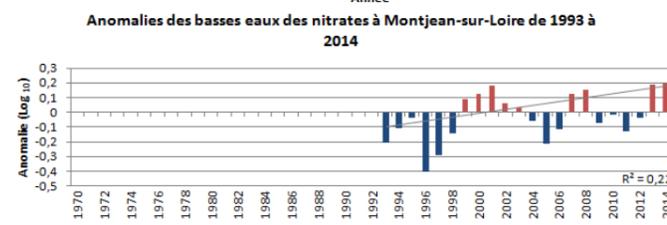
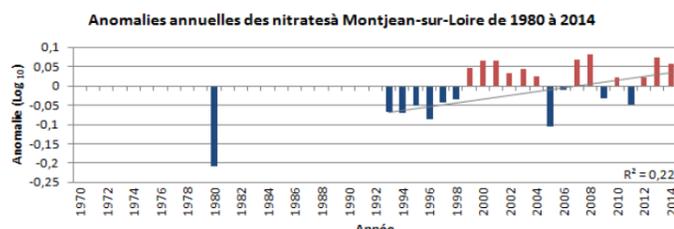
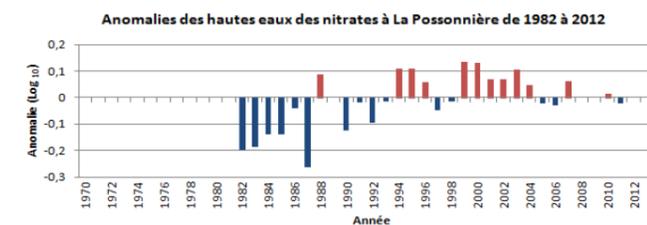
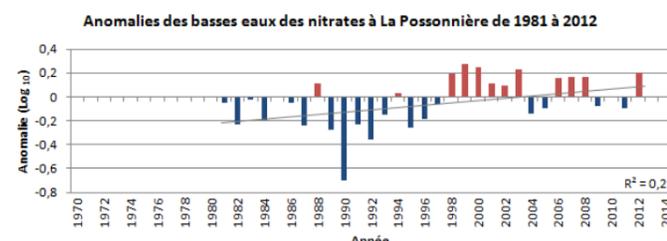
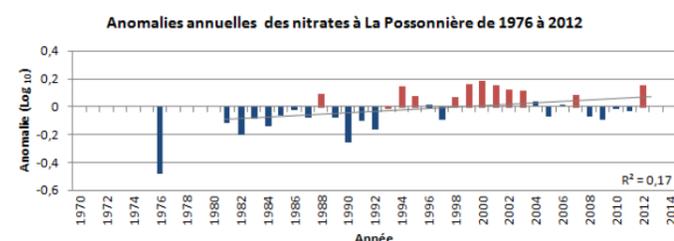
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6 mois) pour les nitrates exprimé en mg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « *ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012* ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

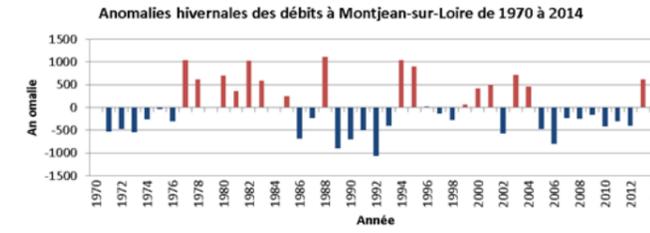
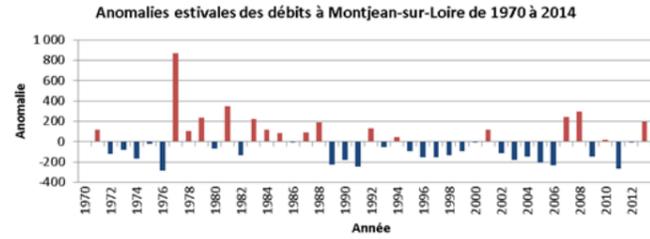
« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

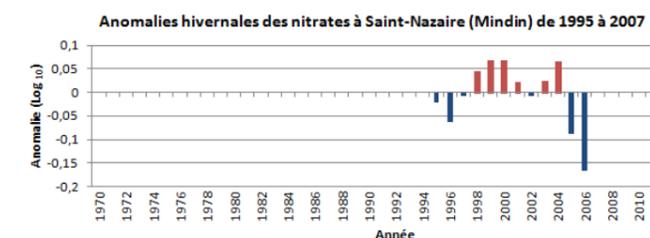
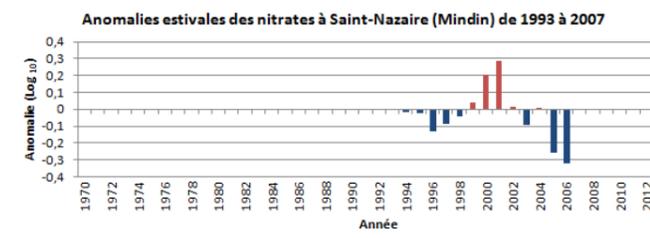
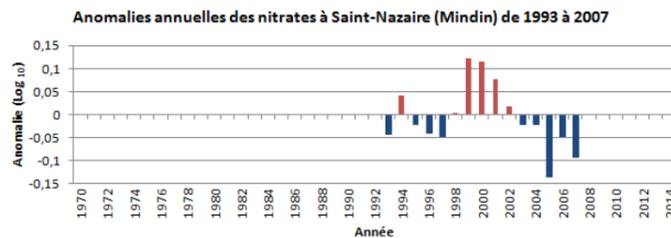
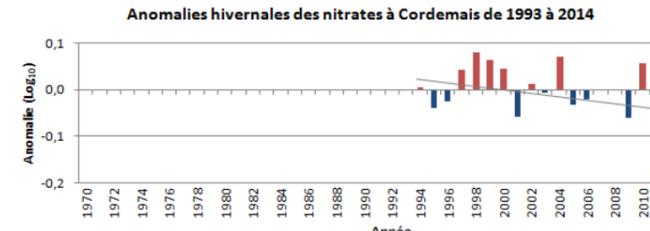
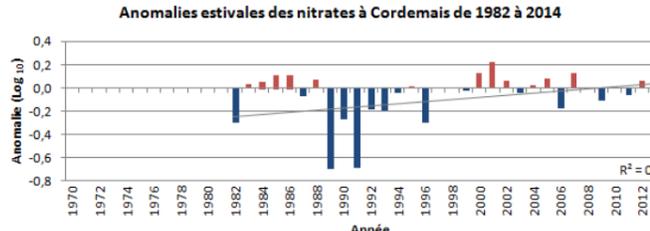
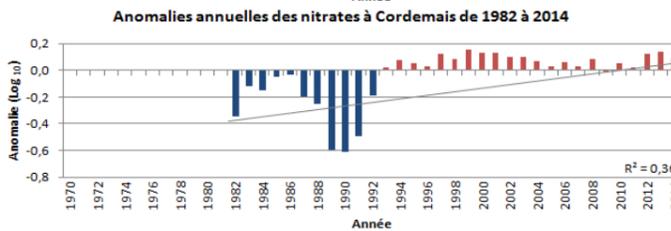
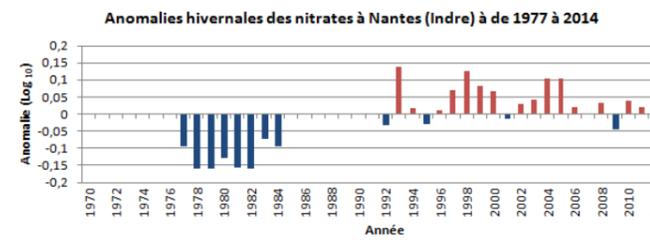
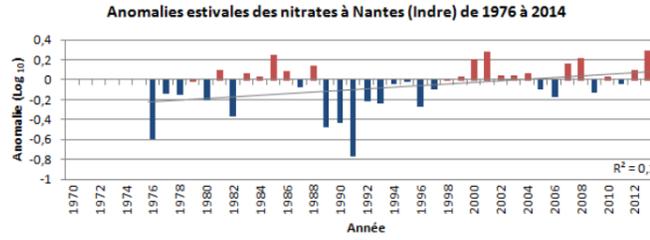
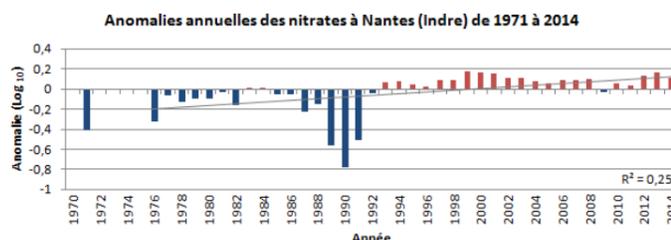
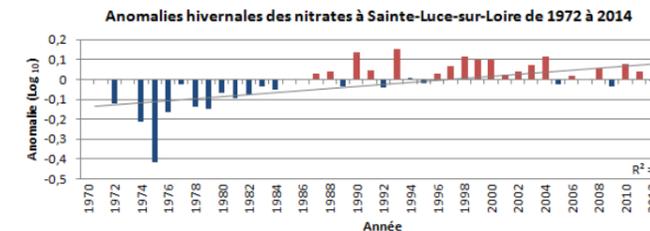
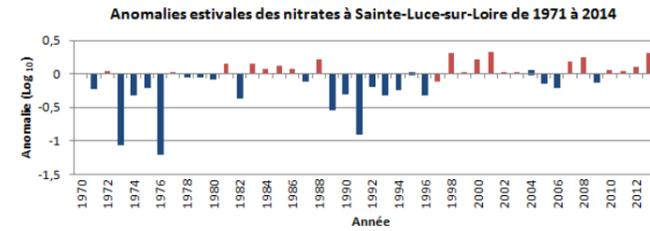
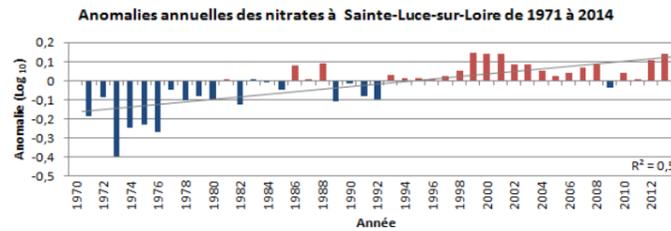
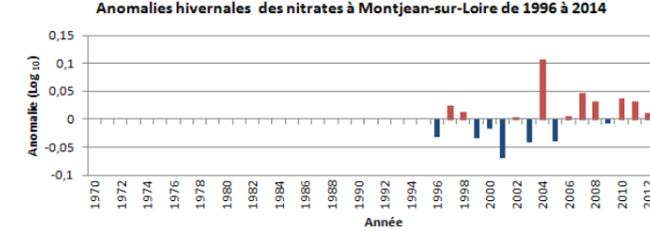
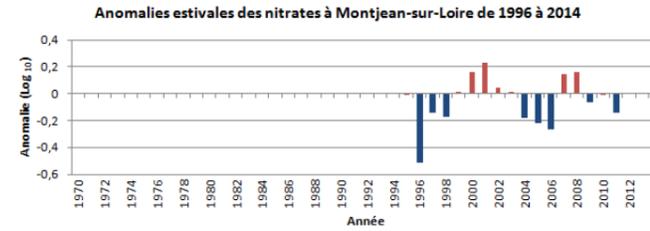
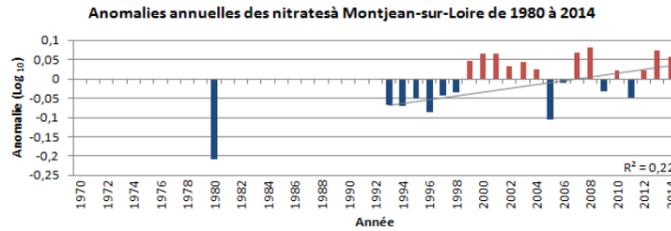
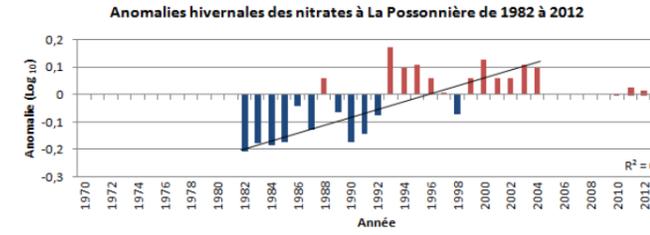
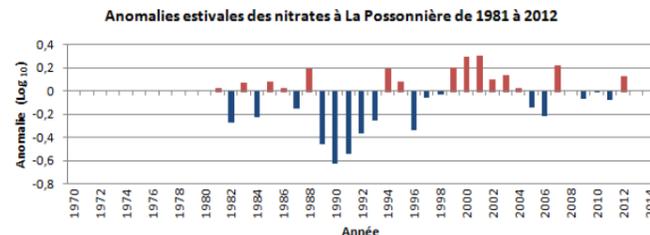
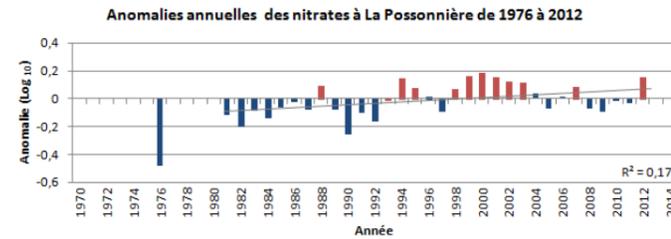
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et hivernale (3 mois) pour les nitrates exprimé en mg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « *ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012* ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

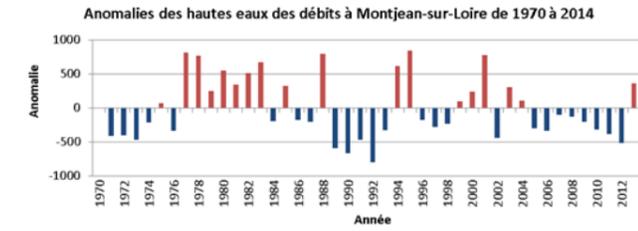
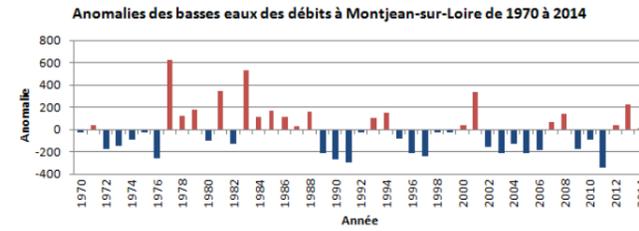
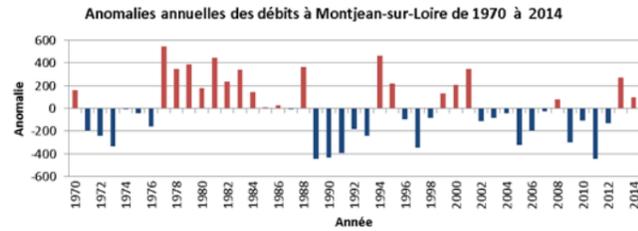
« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

« saison hivernale » : Période de 3 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de décembre à février. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

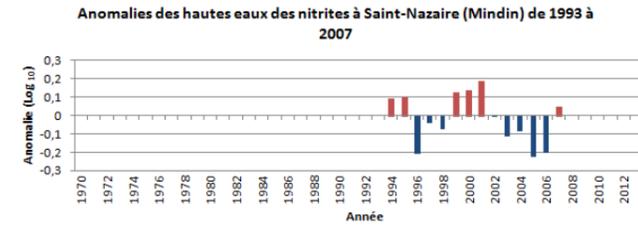
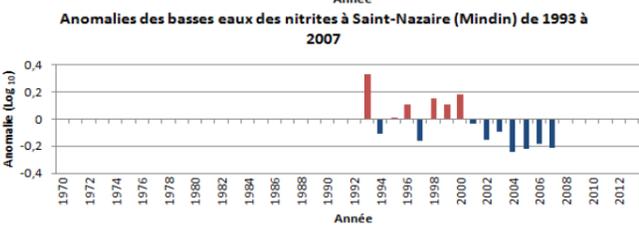
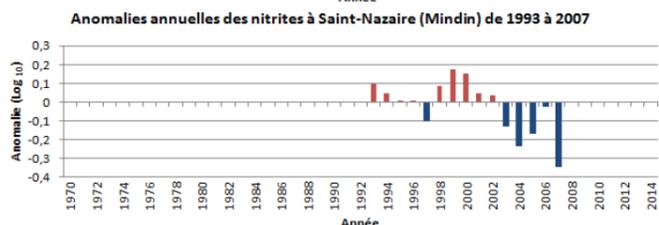
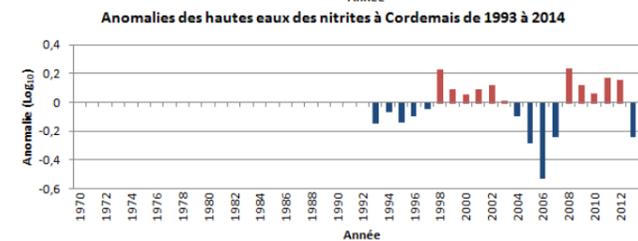
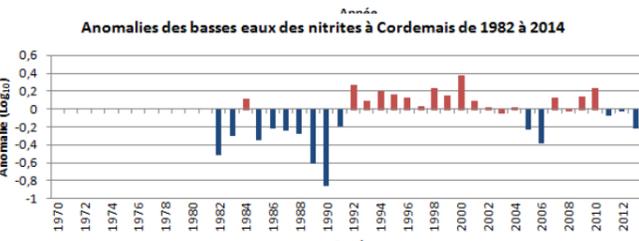
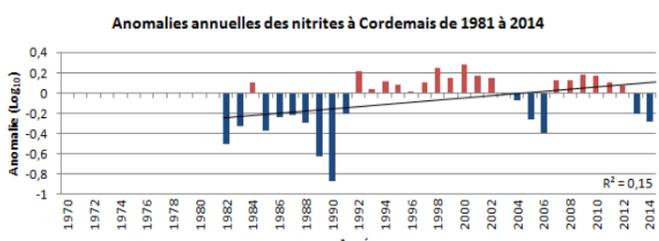
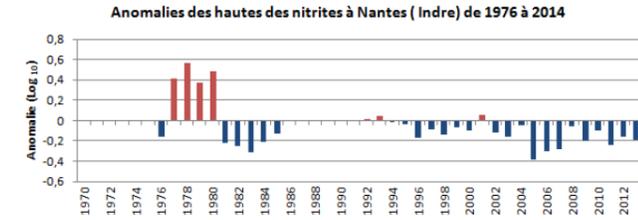
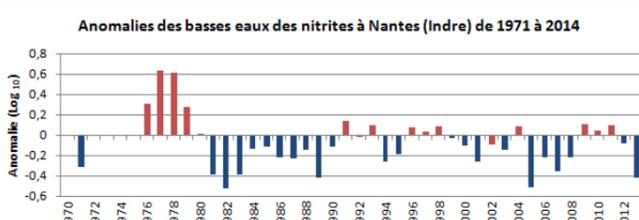
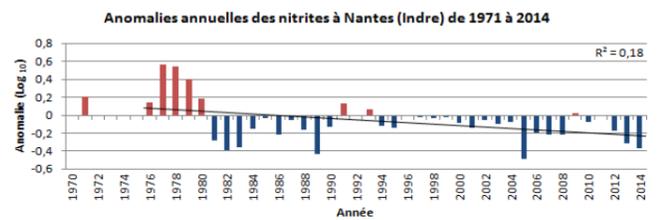
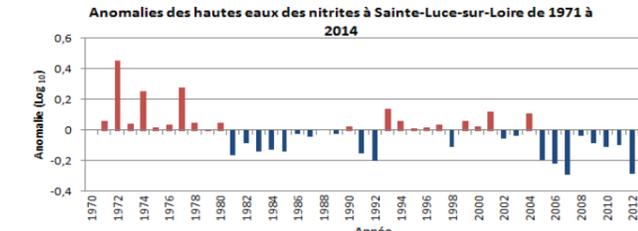
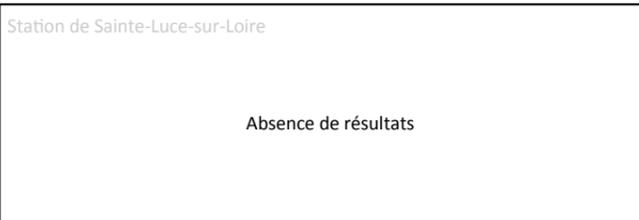
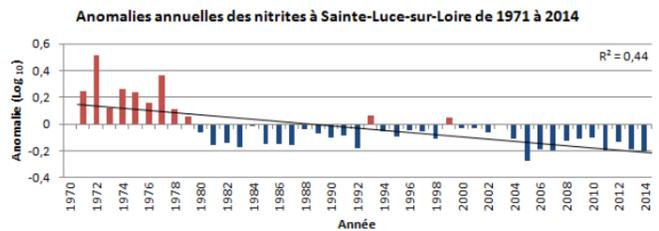
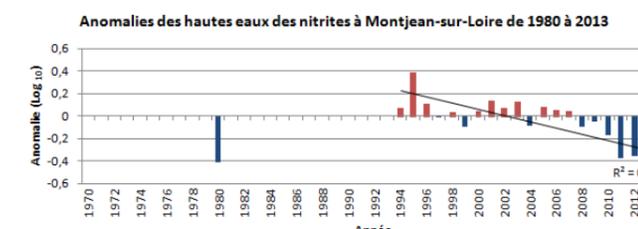
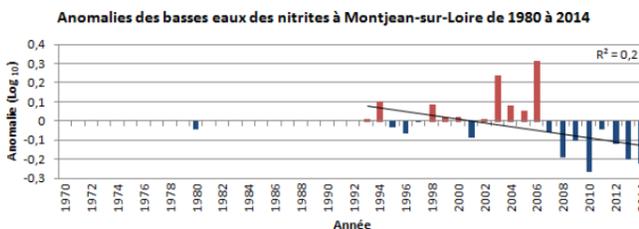
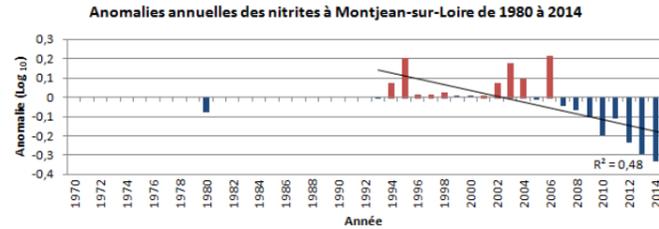
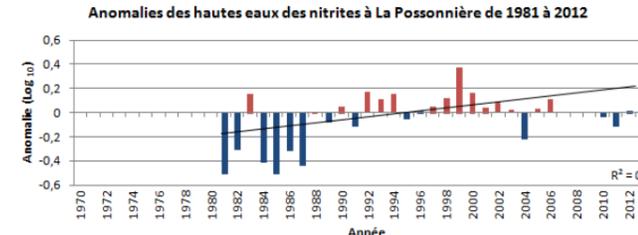
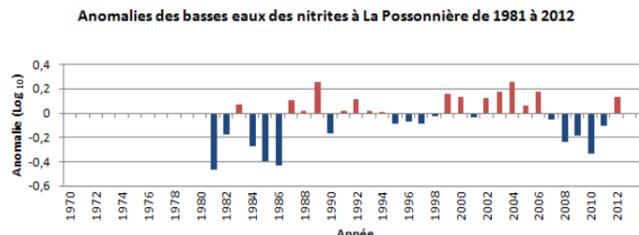
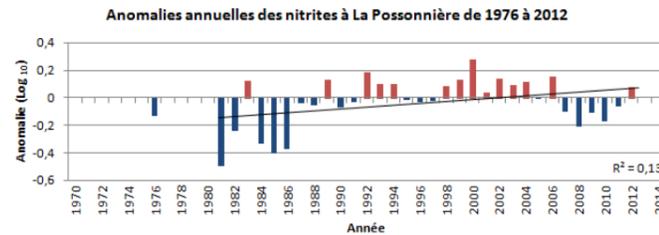
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

• **Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



• **Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6 mois) pour les nitrites exprimé en mg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

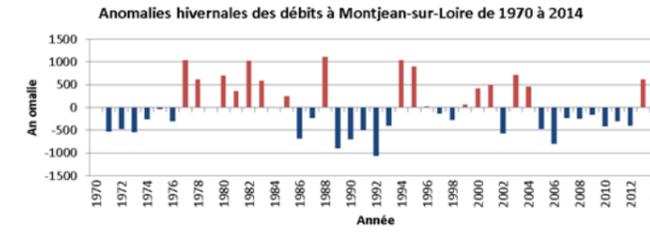
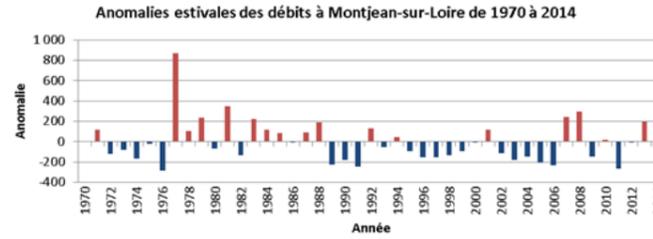
« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

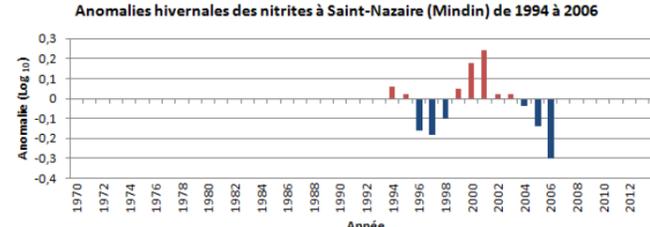
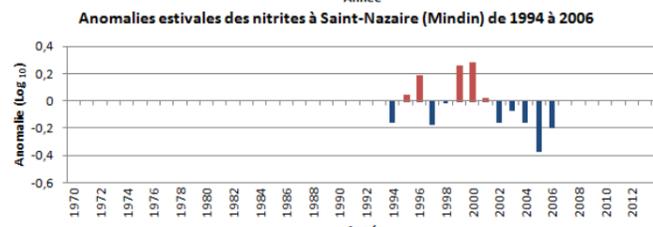
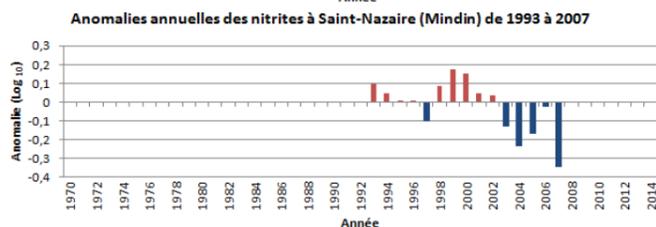
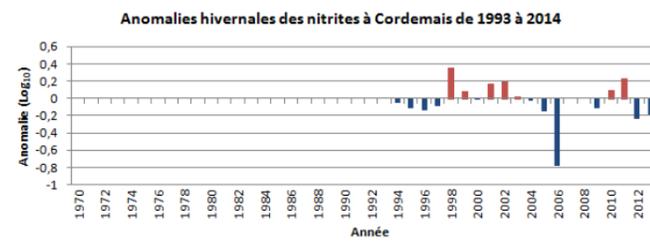
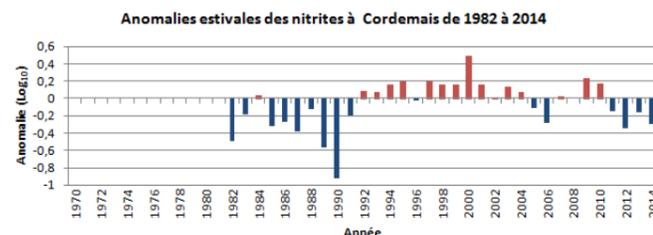
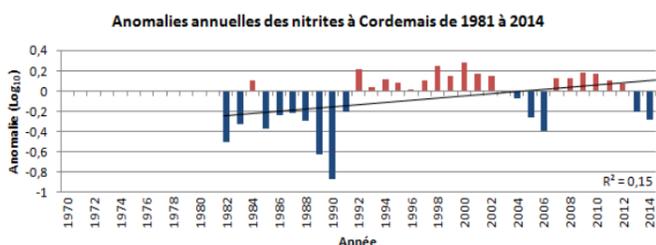
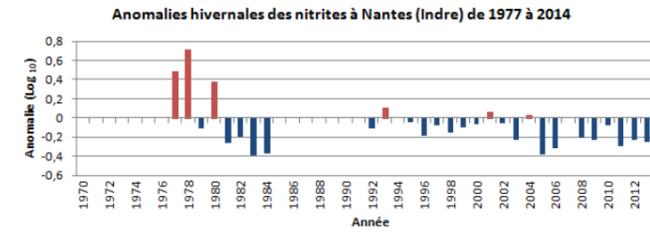
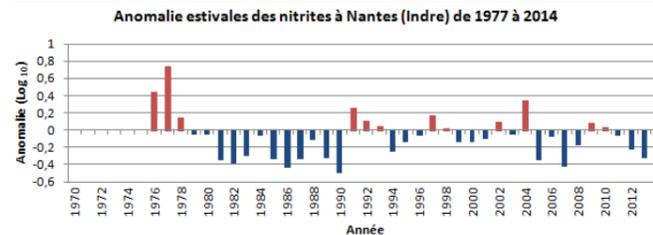
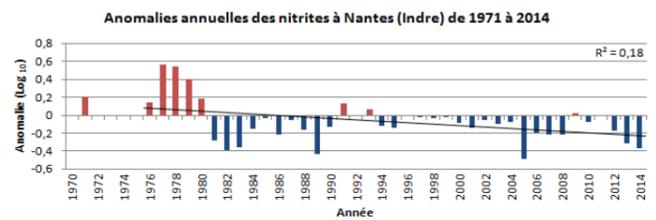
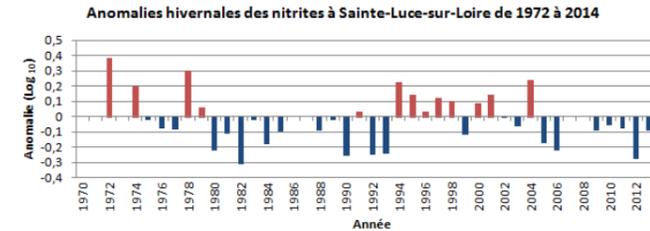
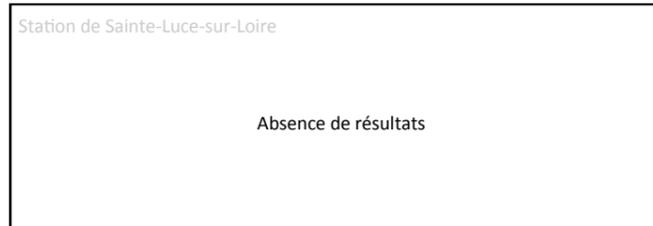
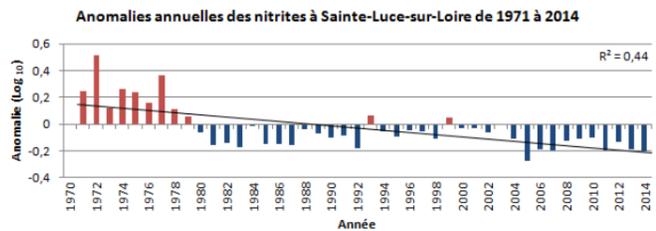
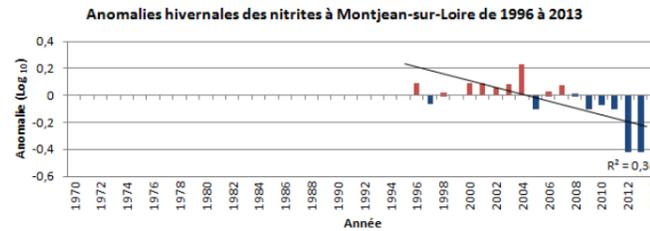
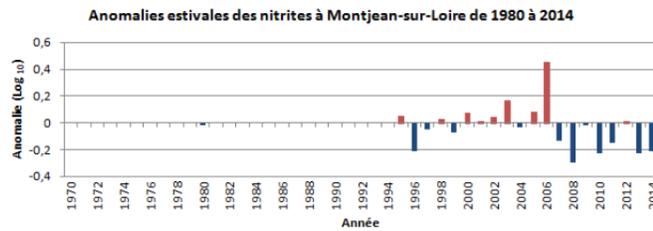
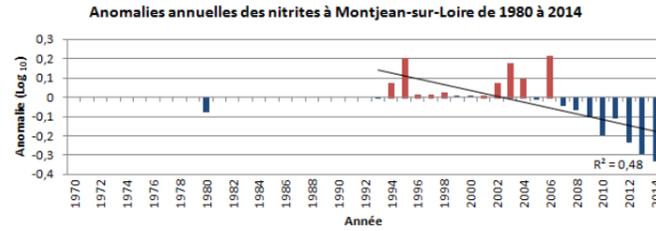
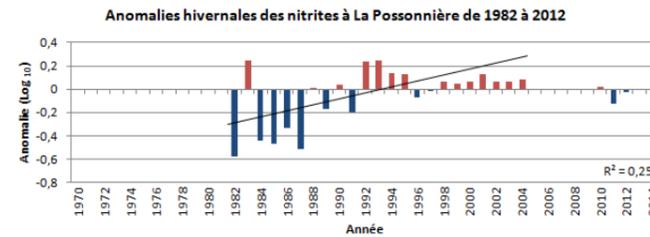
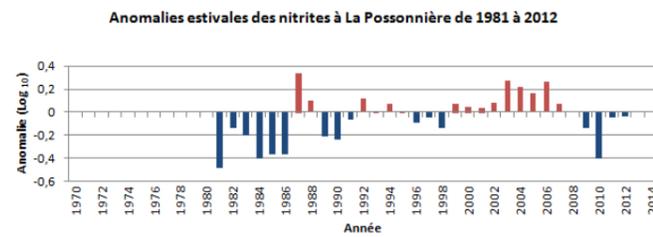
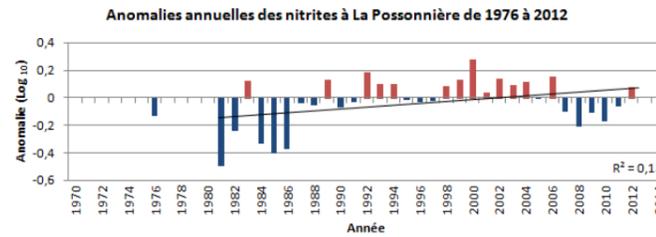
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

• **Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



• **Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et hivernale (3 mois) pour les nitrites exprimé en mg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

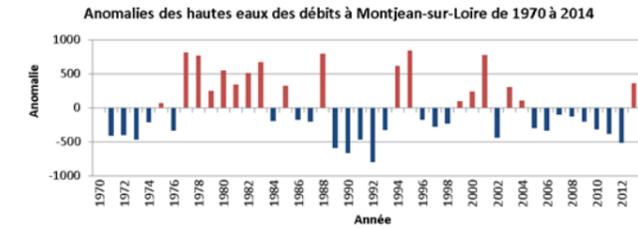
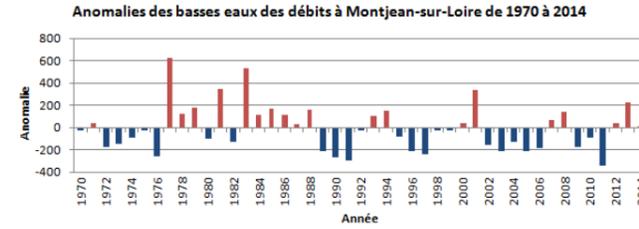
« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

« saison hivernale » : Période de 3 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de décembre à février. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

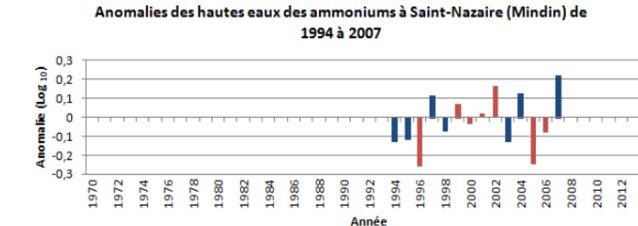
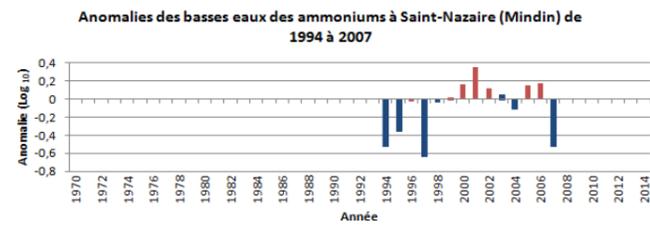
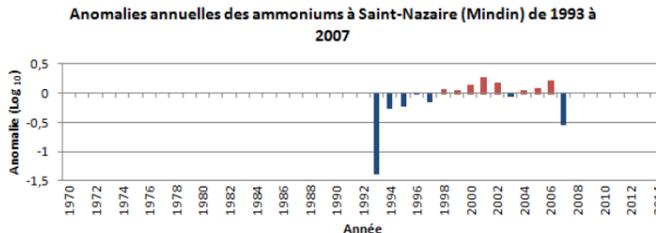
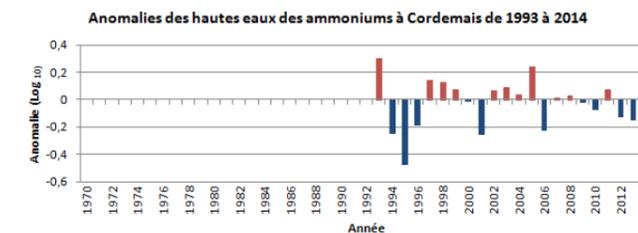
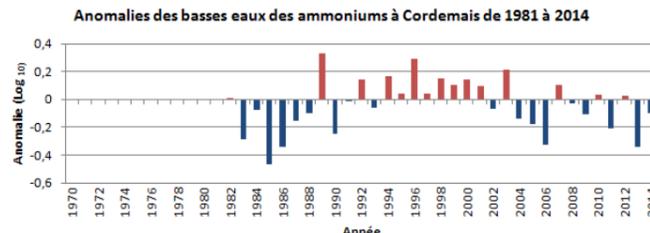
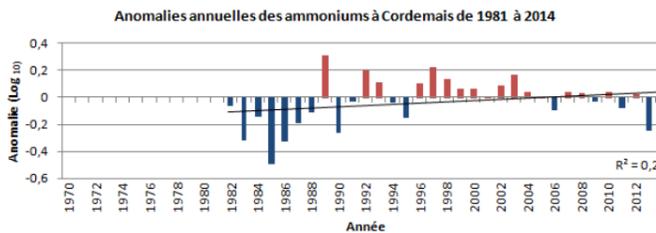
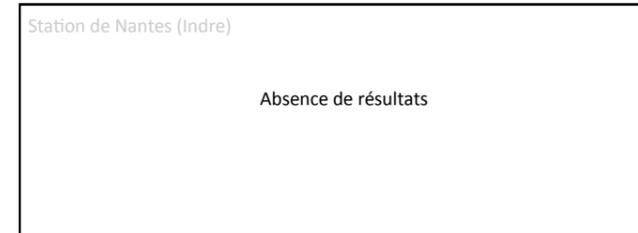
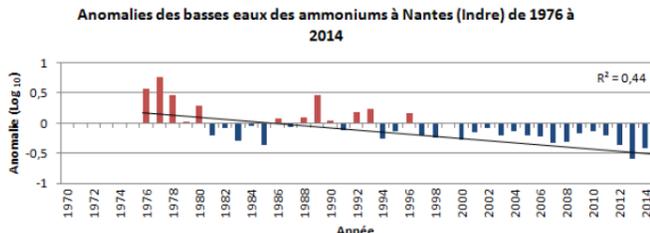
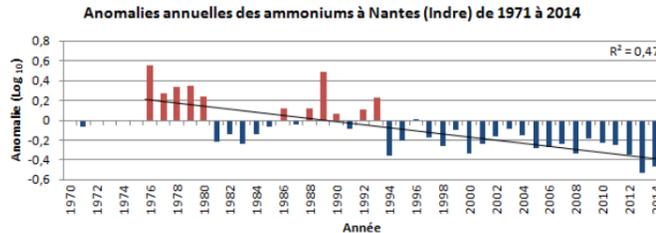
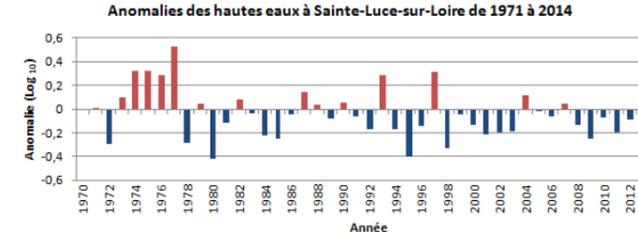
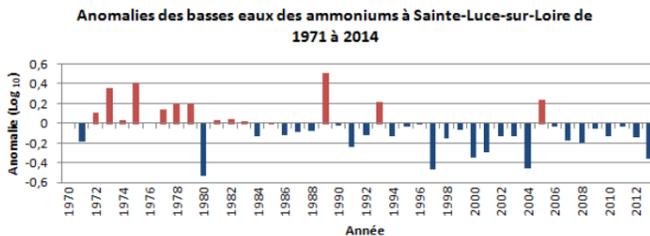
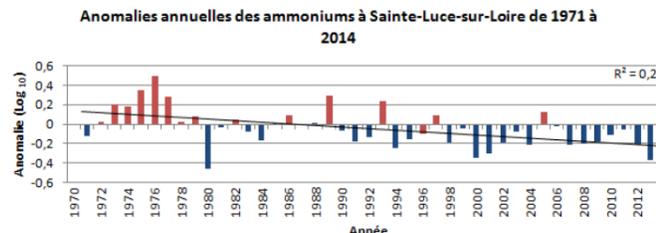
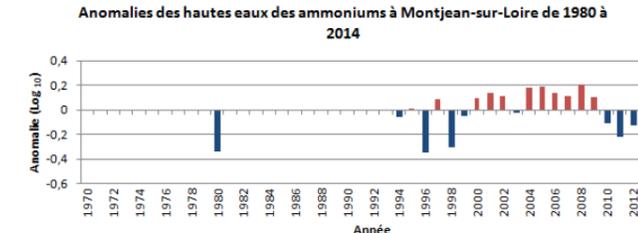
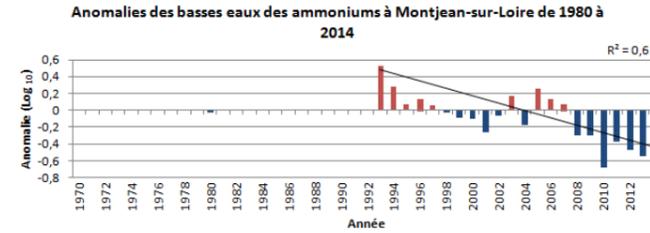
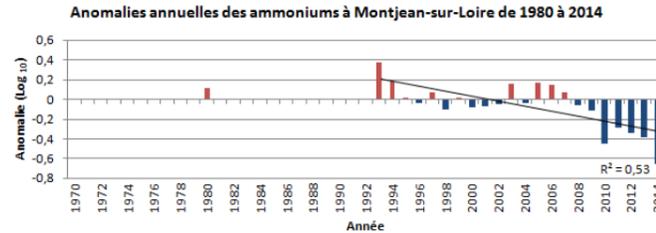
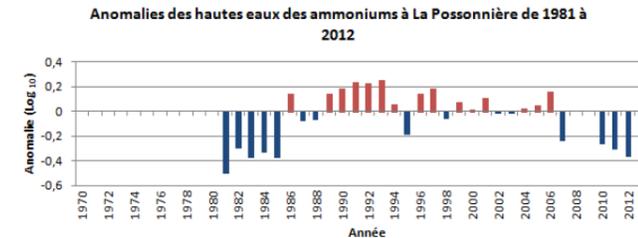
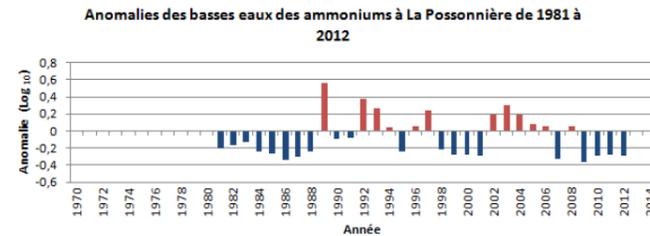
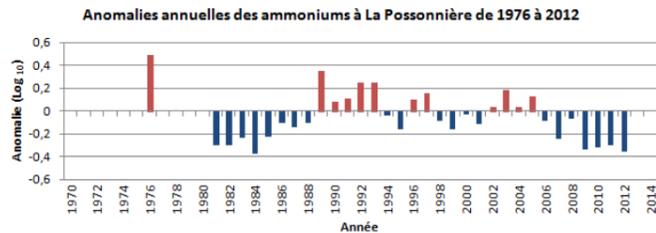
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

• **Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



• **Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6 mois) pour l'ammonium exprimé en mg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « *ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012* ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

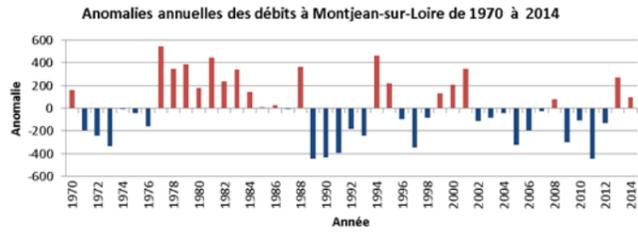
« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

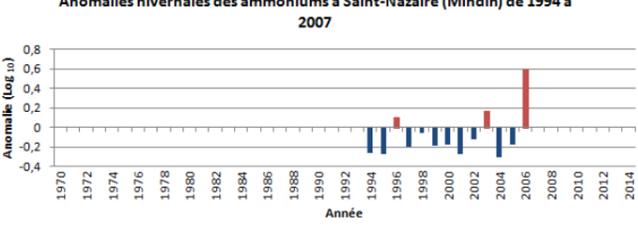
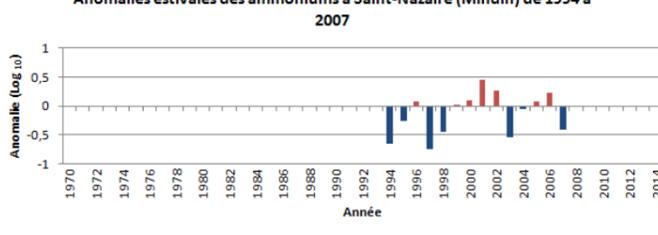
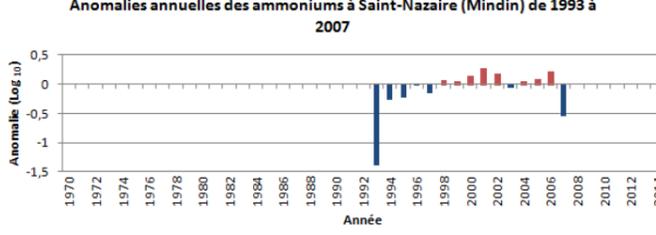
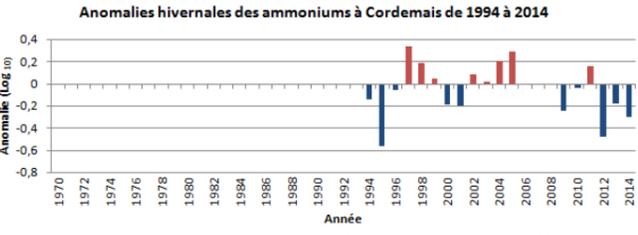
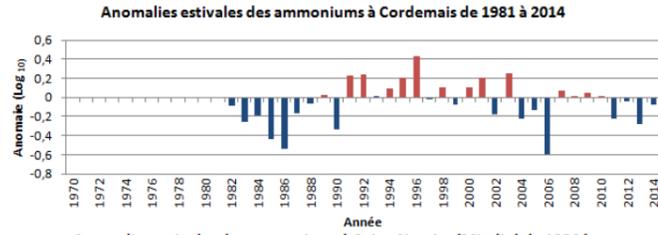
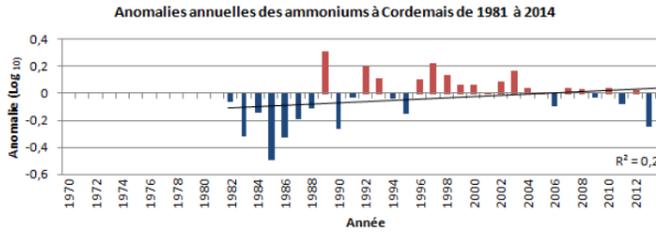
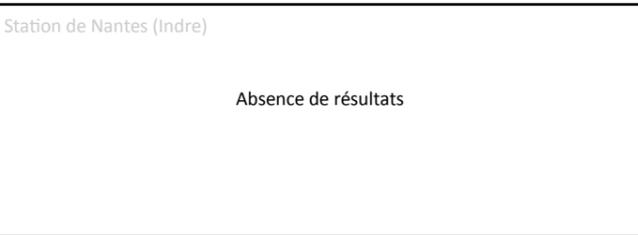
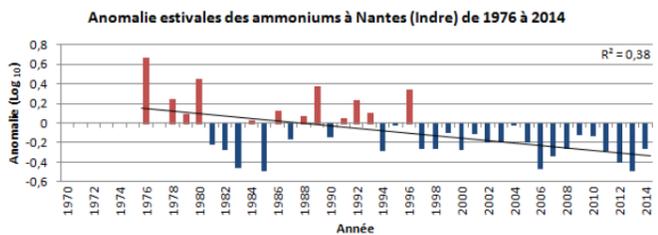
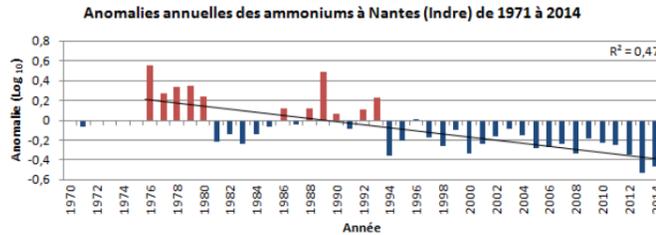
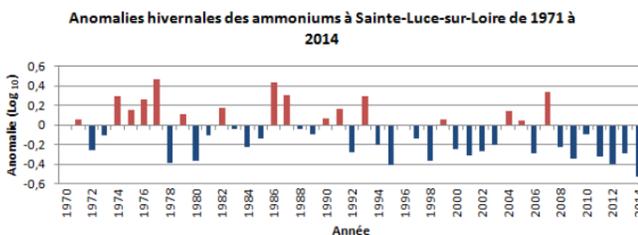
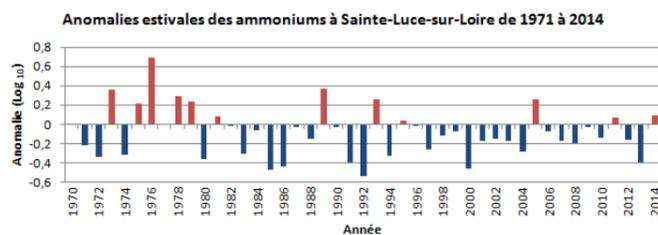
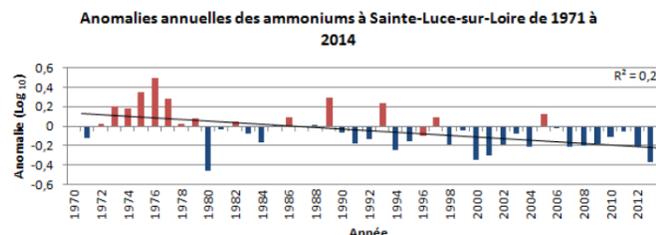
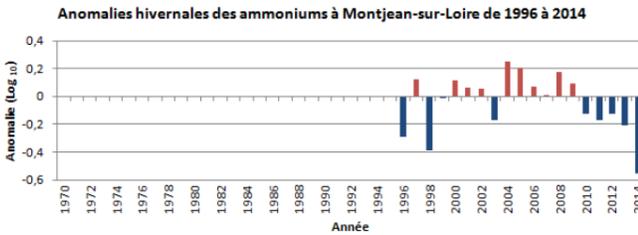
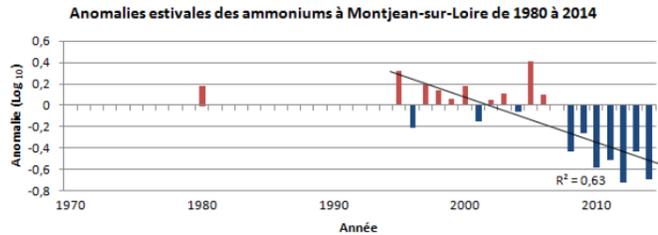
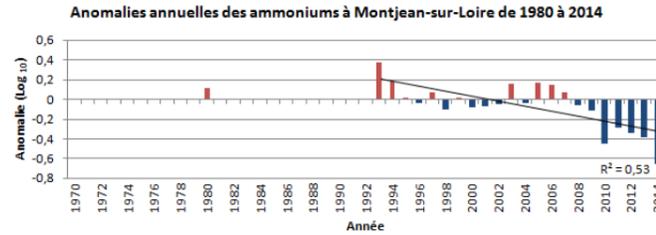
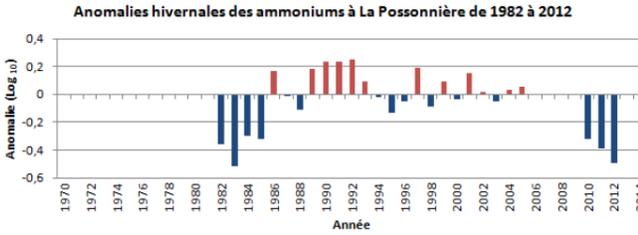
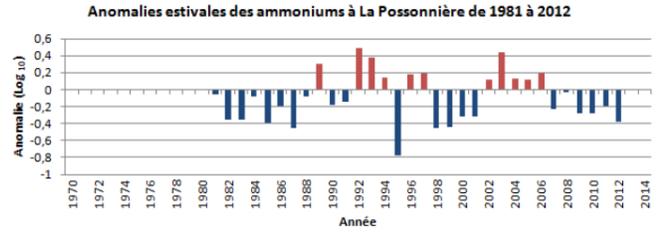
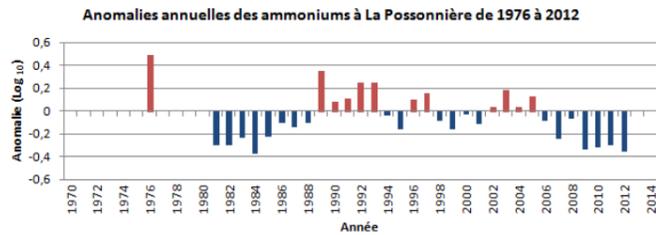
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

• **Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



• **Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et hivernale (3 mois)**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

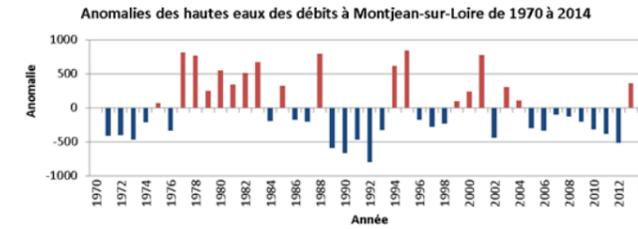
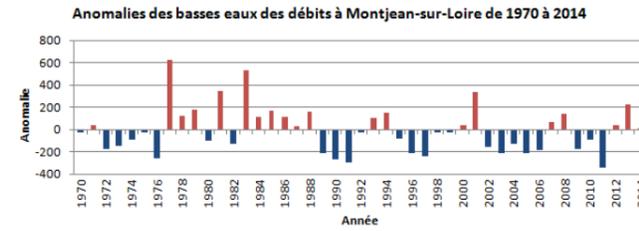
« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

« saison hivernale » : Période de 3 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de décembre à février. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

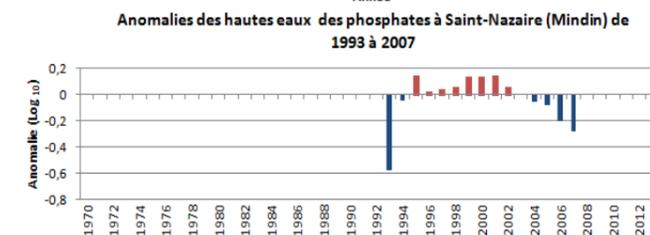
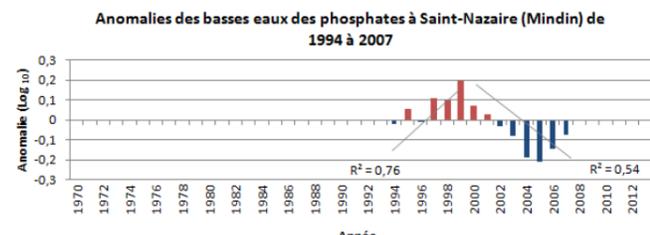
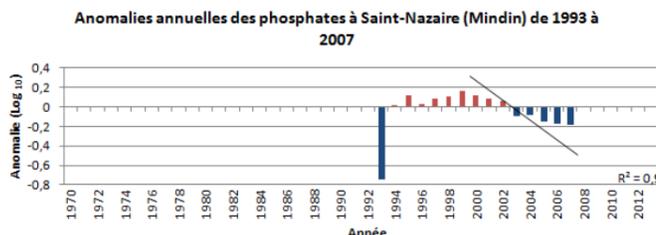
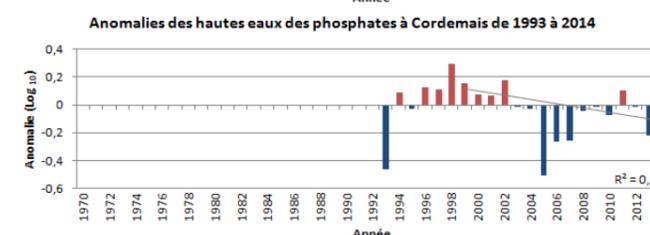
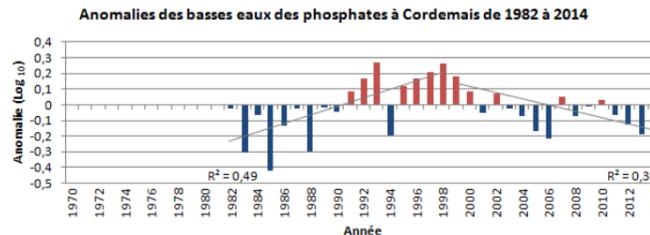
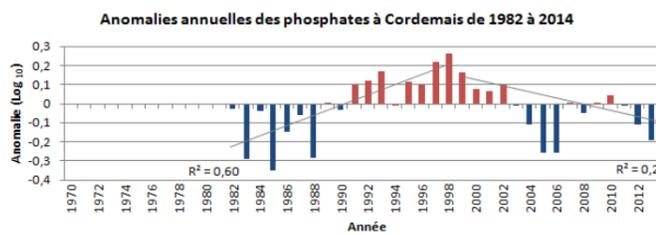
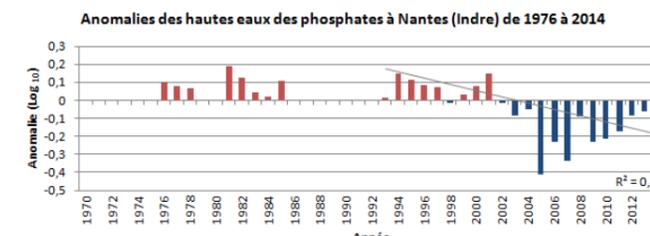
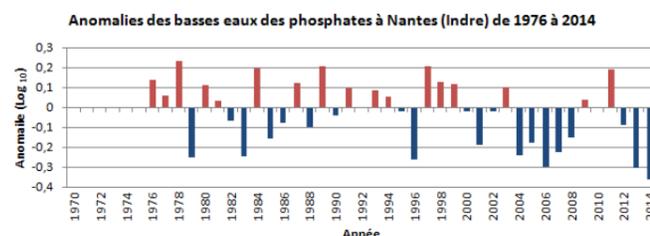
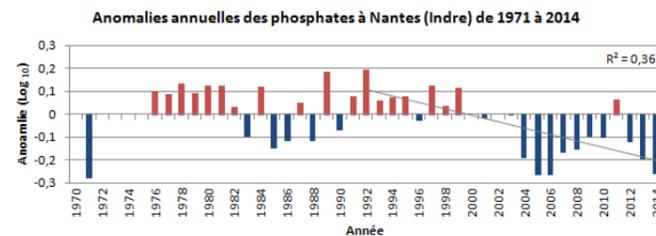
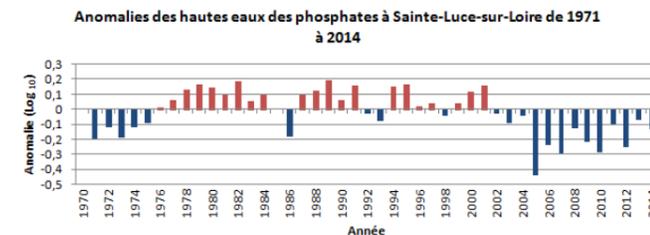
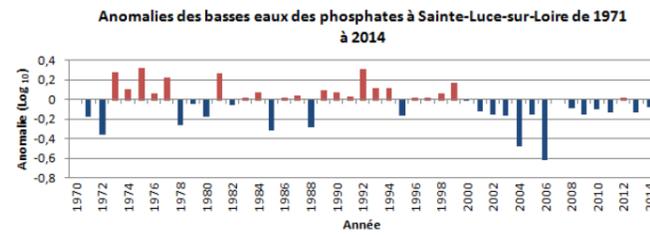
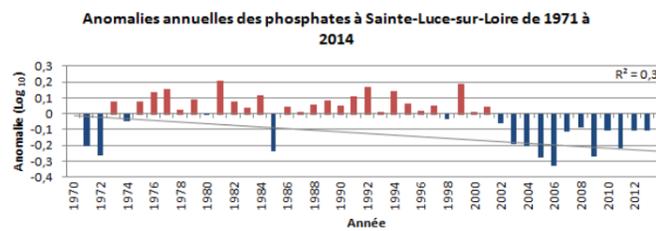
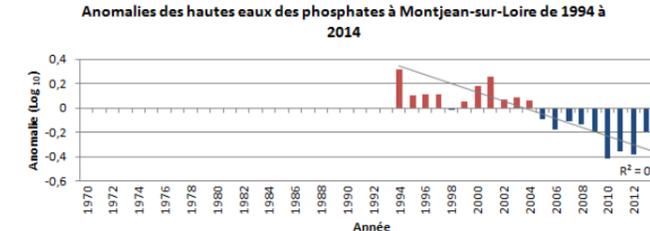
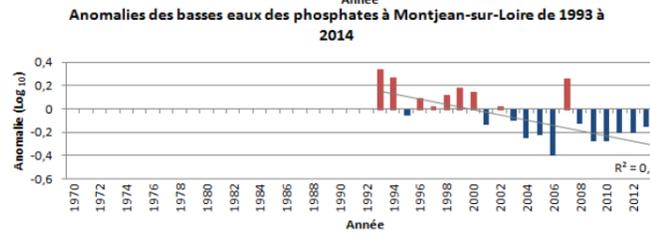
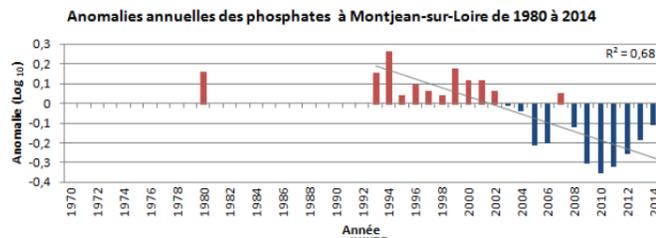
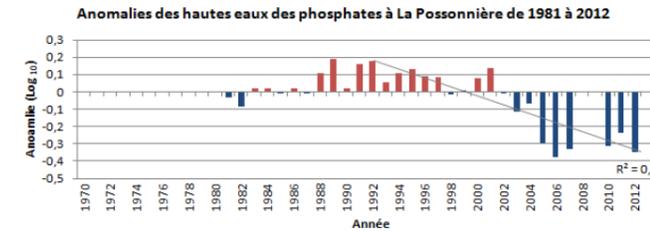
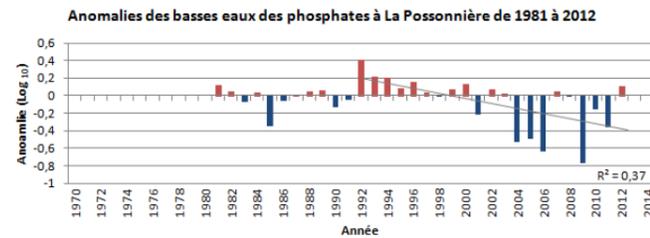
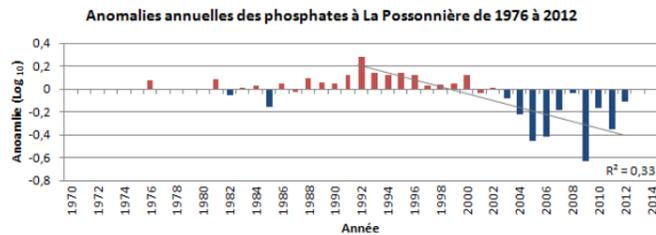
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire



- Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6)



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

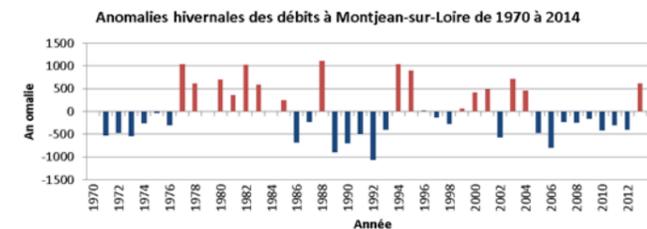
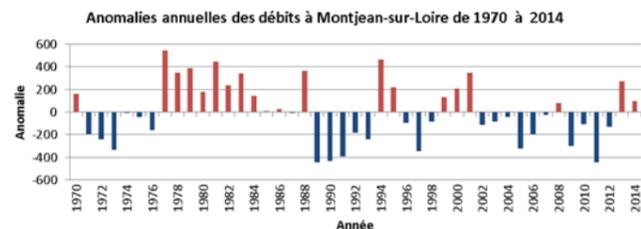
« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

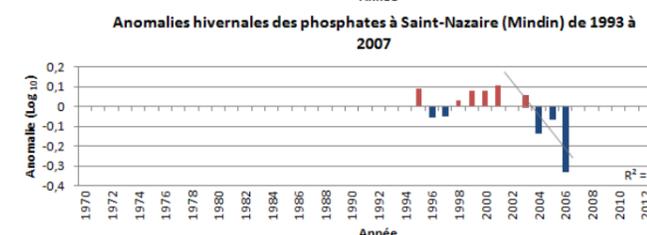
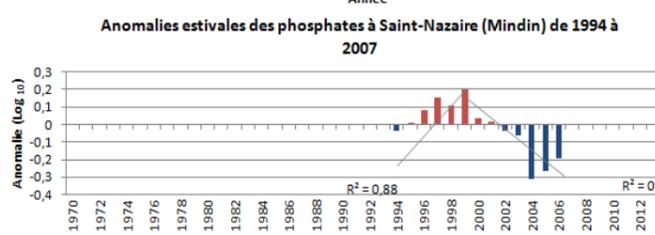
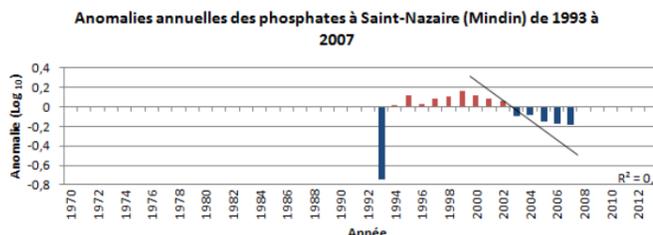
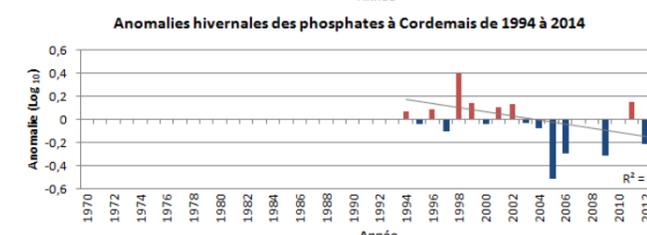
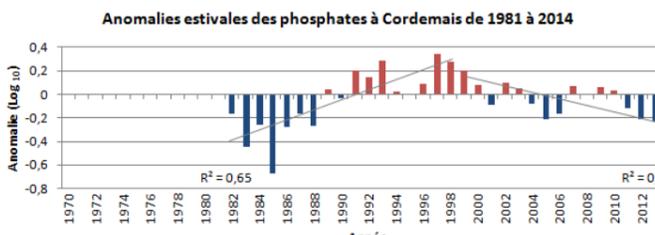
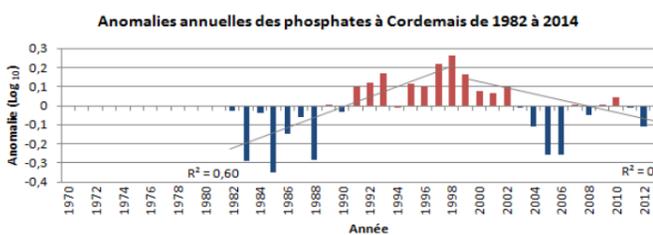
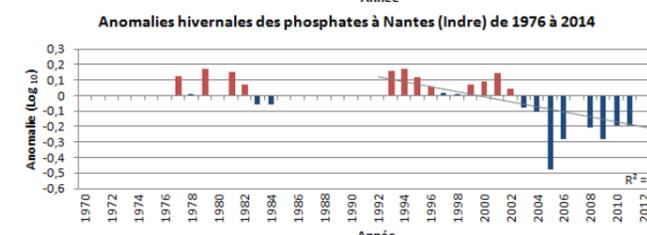
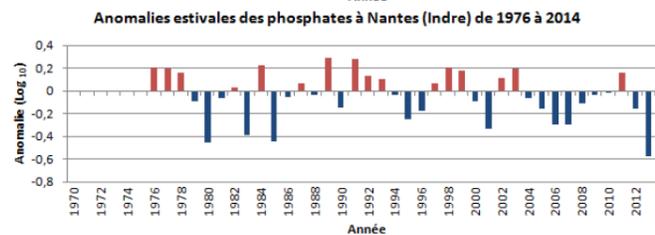
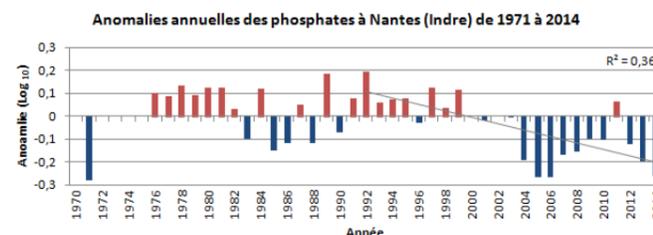
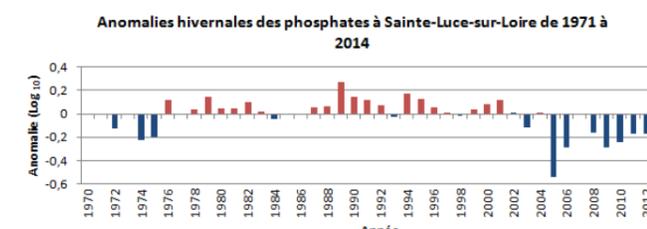
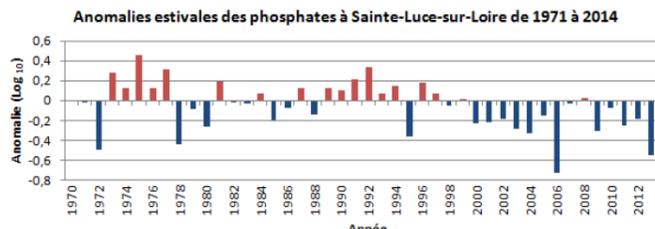
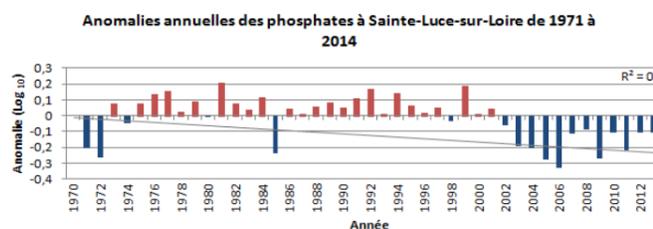
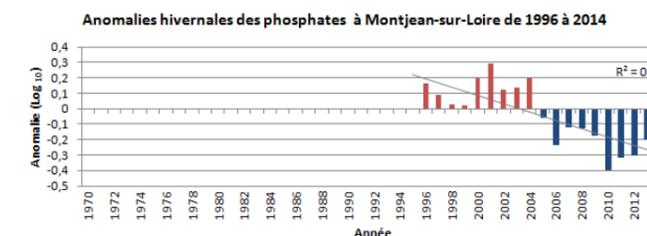
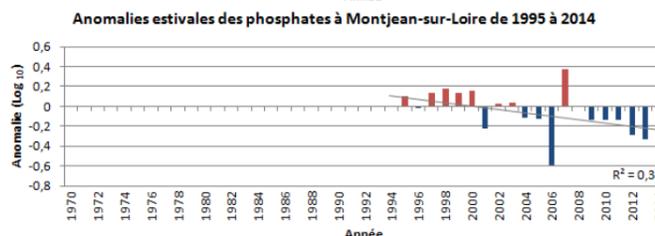
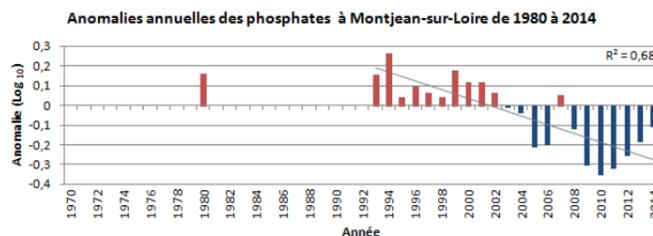
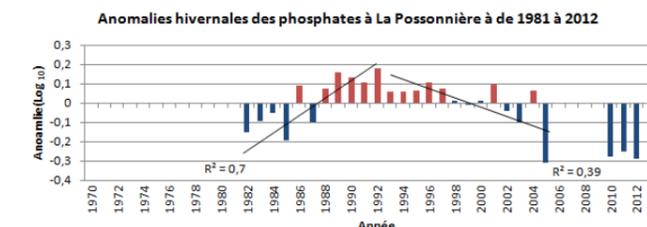
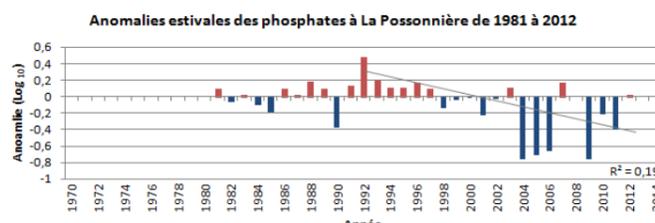
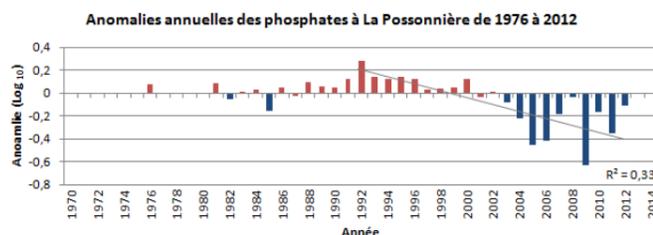
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et hivernale (3 mois) pour le phosphate exprimé en mg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « *ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012* ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

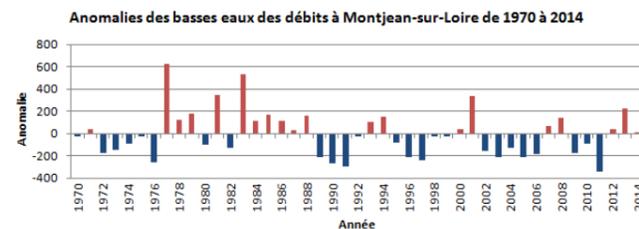
« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

« saison hivernale » : Période de 3 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de décembre à février. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

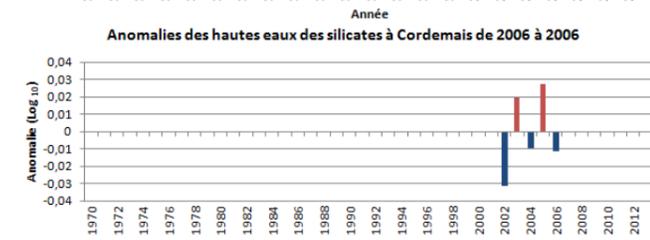
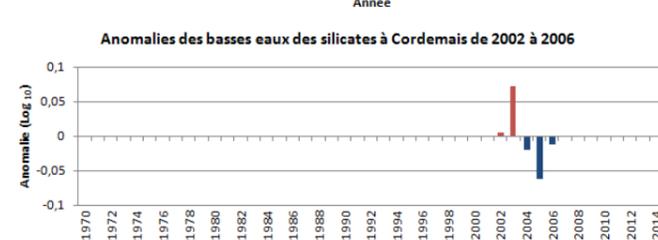
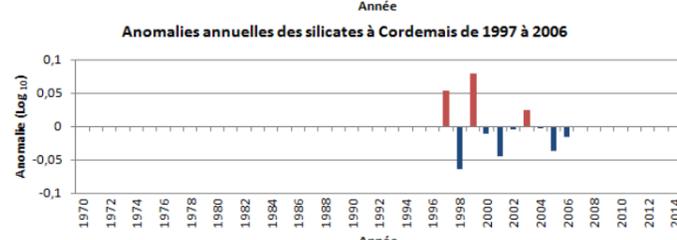
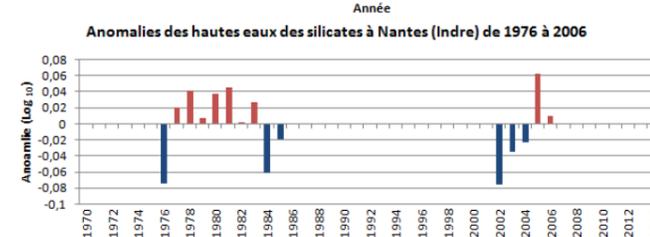
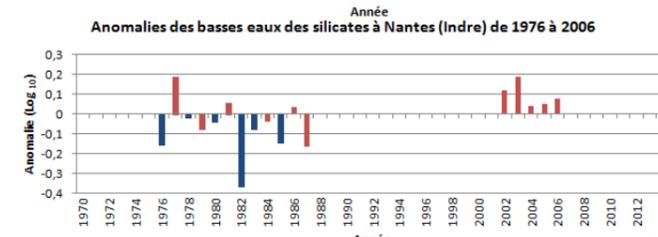
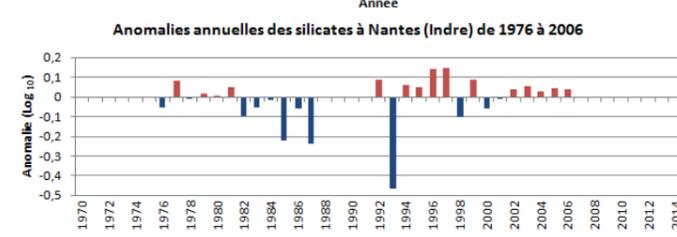
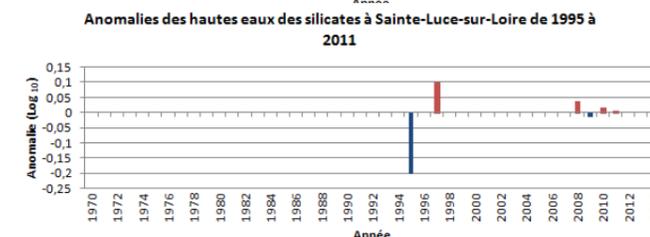
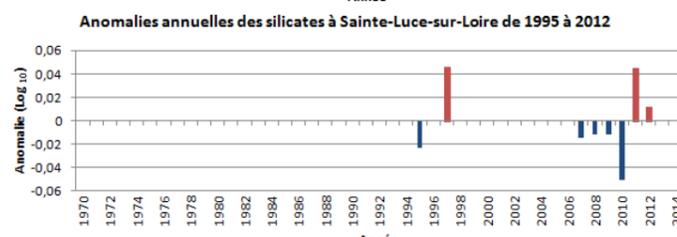
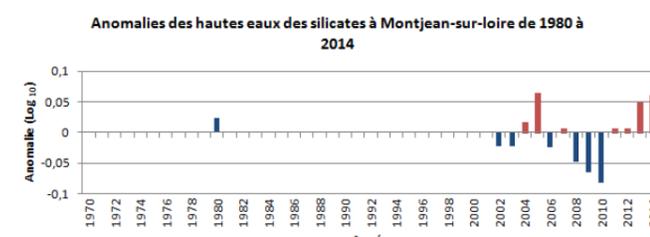
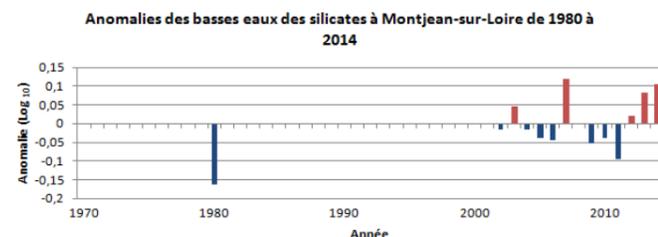
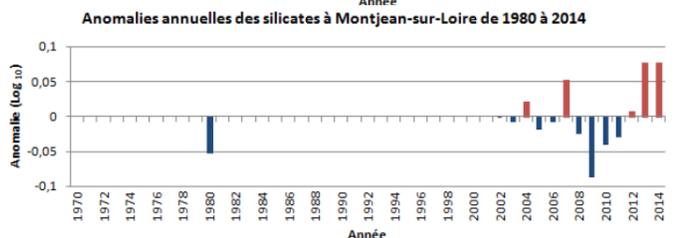
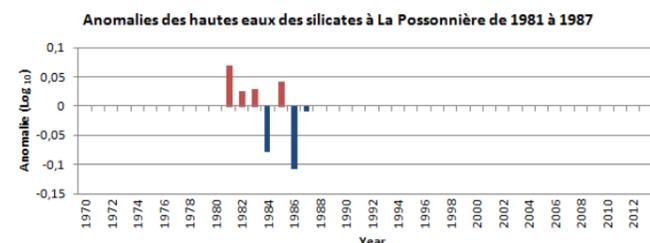
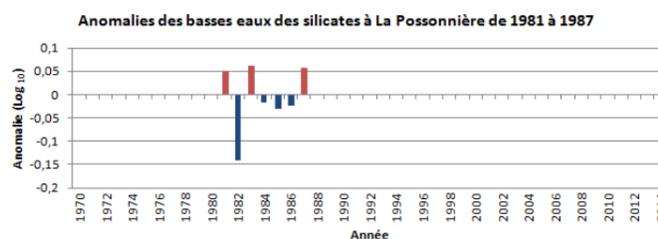
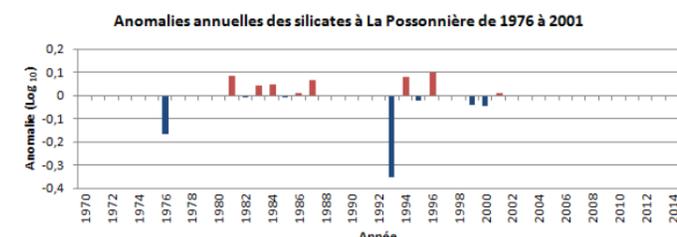
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6 mois) pour les silicates exprimé en mg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « *ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012* ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

Station de Saint-Nazaire

Absence de résultats

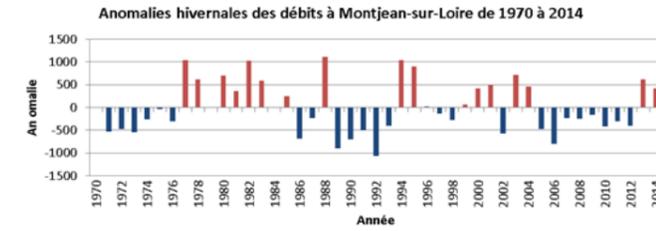
Station de Saint-Nazaire

Absence de résultats

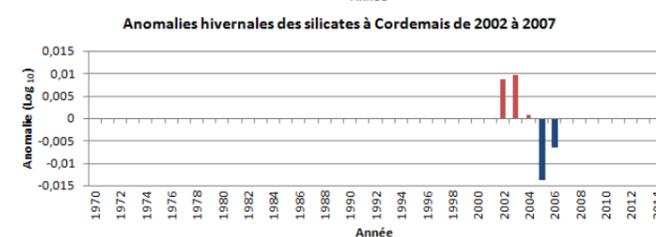
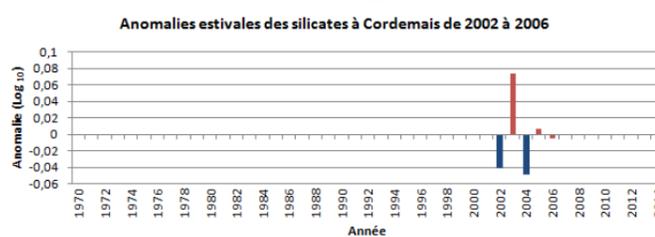
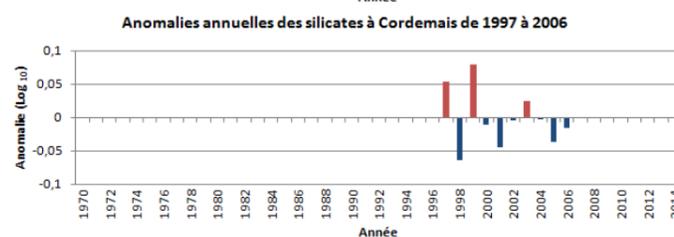
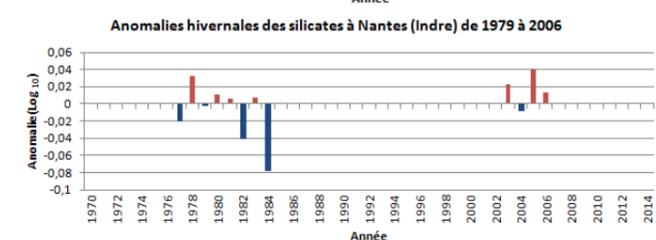
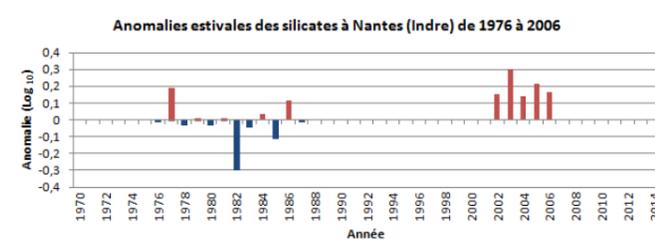
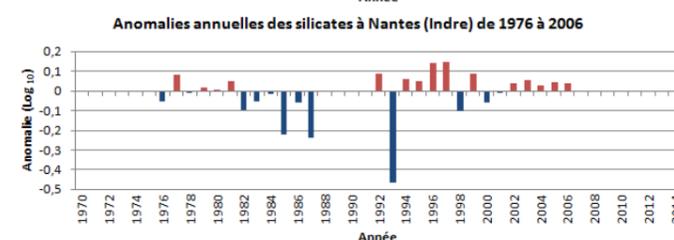
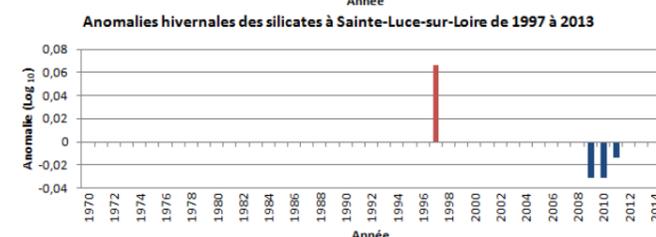
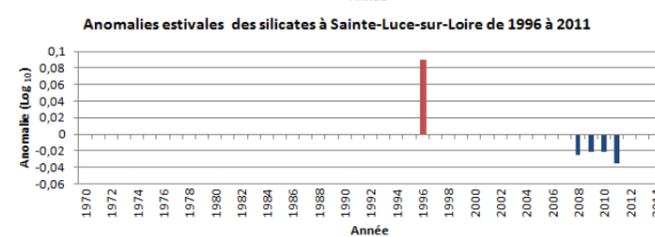
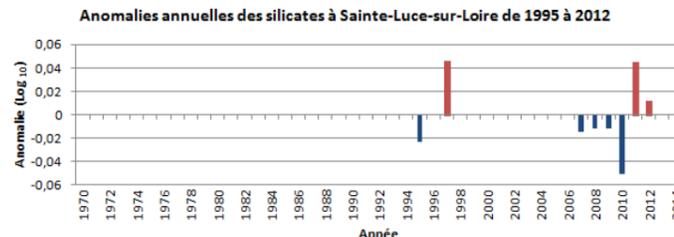
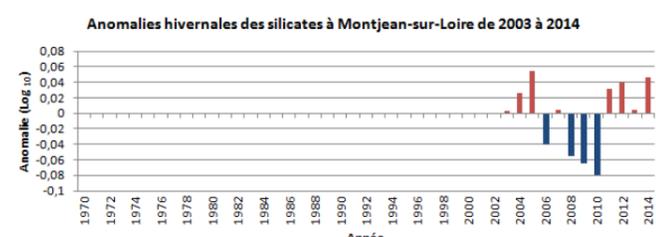
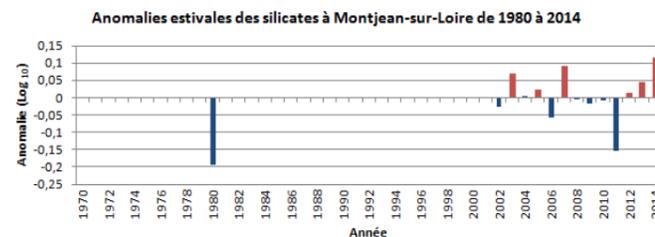
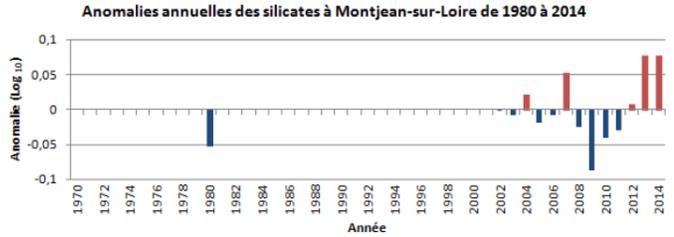
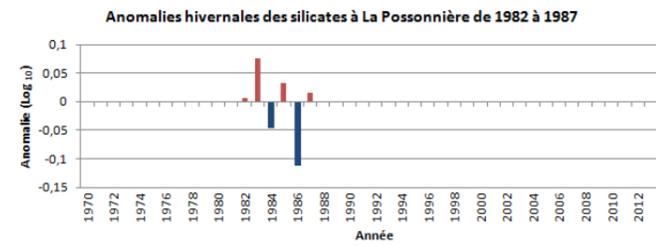
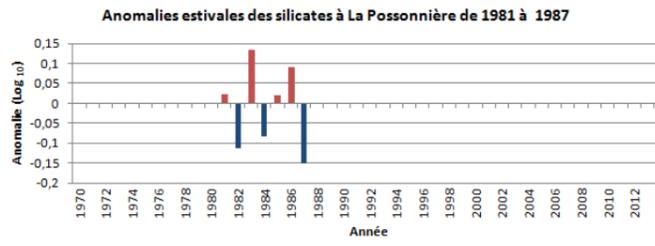
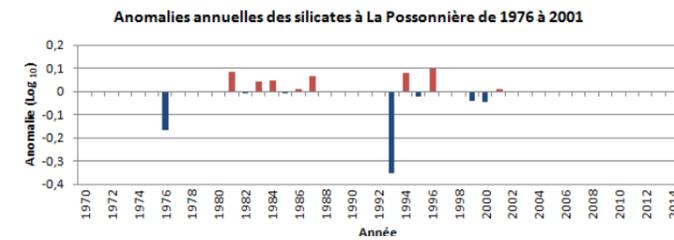
Station de Saint-Nazaire

Absence de résultats

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et hivernale (3 mois) pour les silicates exprimé en mg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

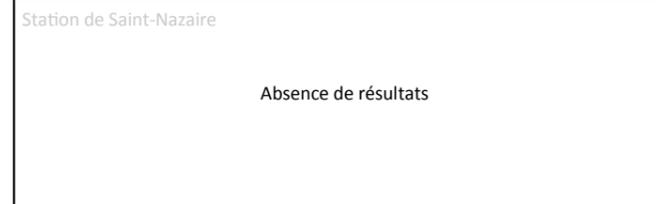
L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

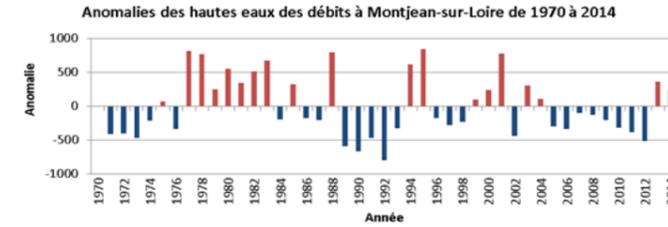
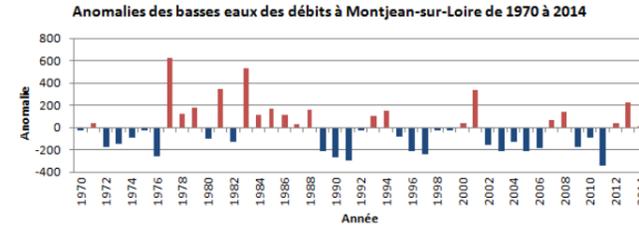
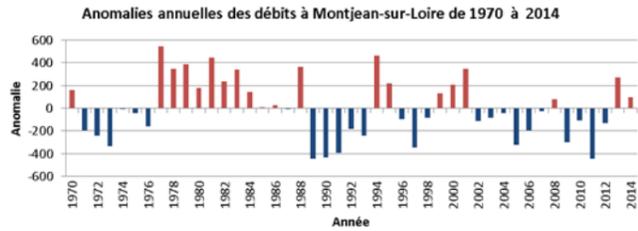
« saison hivernale » : Période de 3 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de décembre à février. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

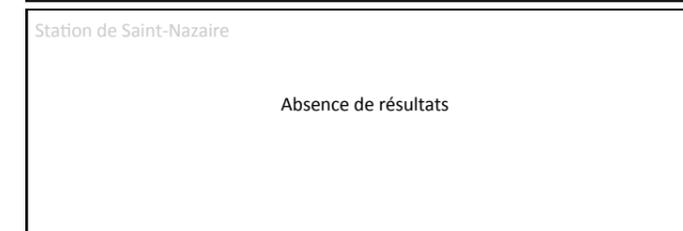
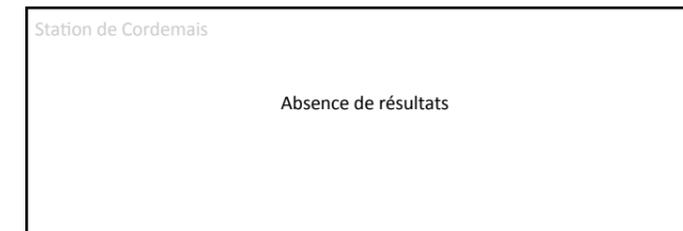
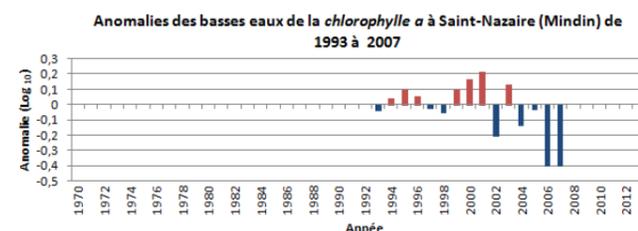
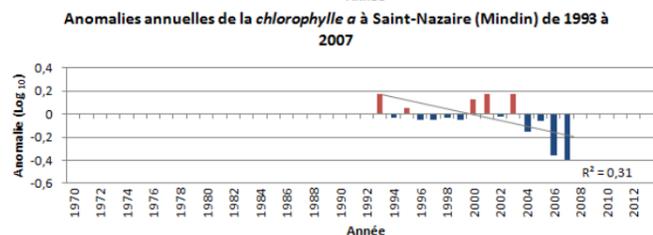
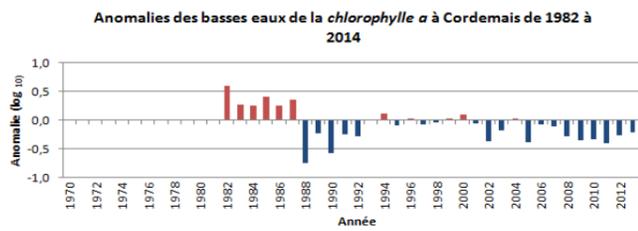
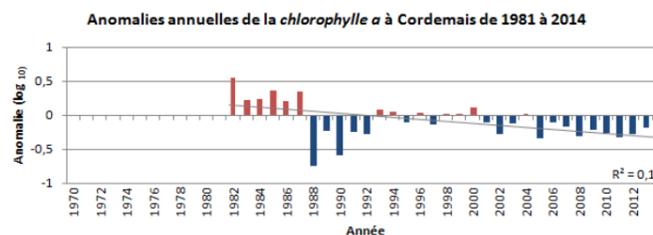
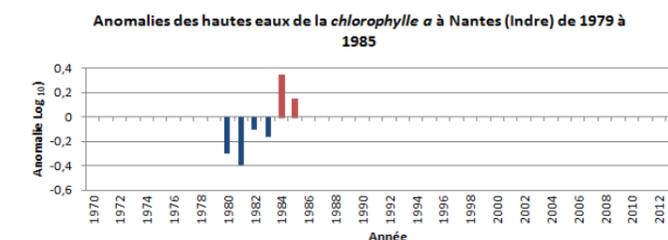
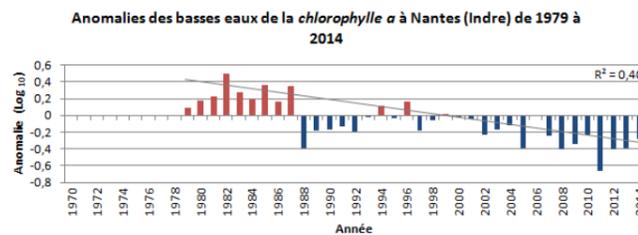
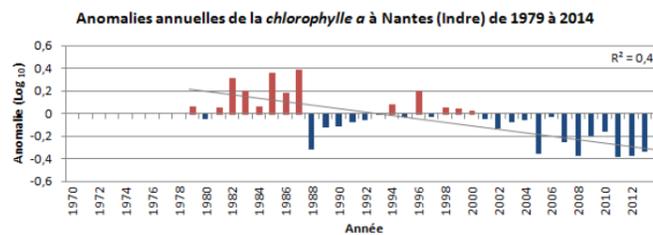
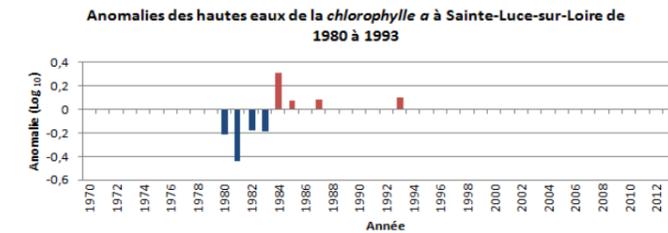
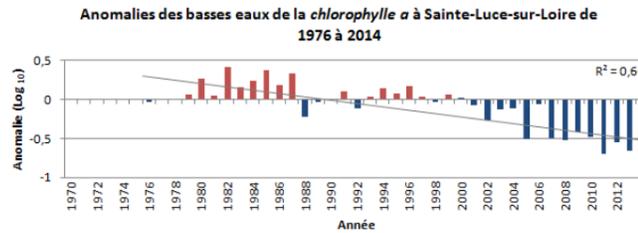
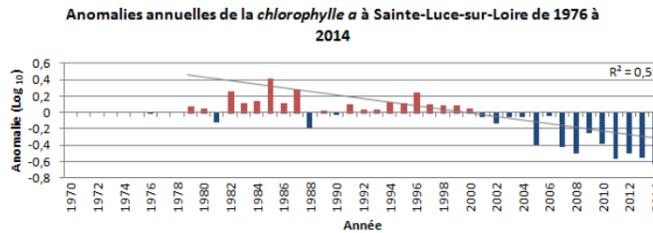
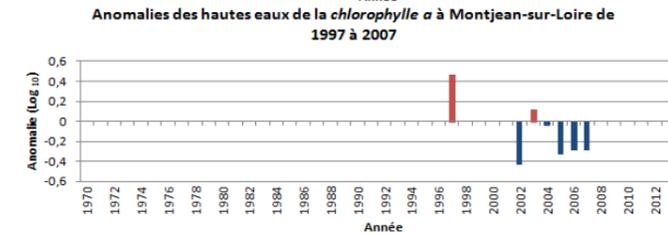
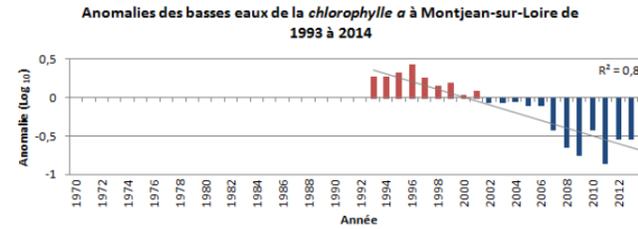
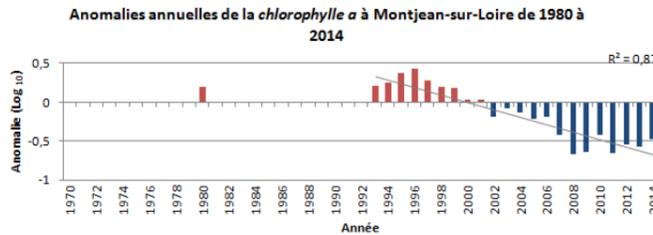
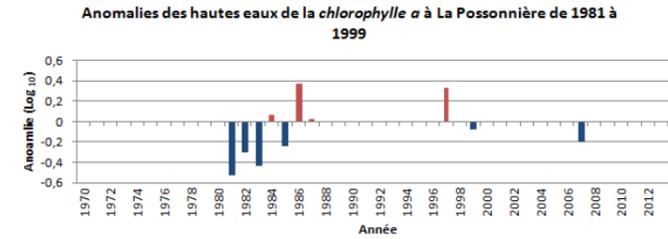
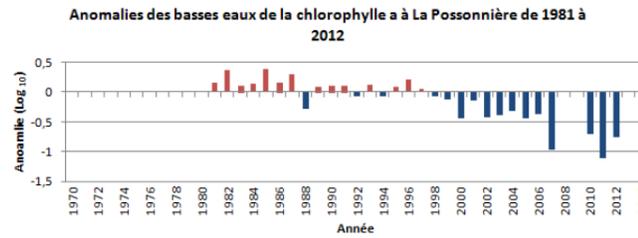
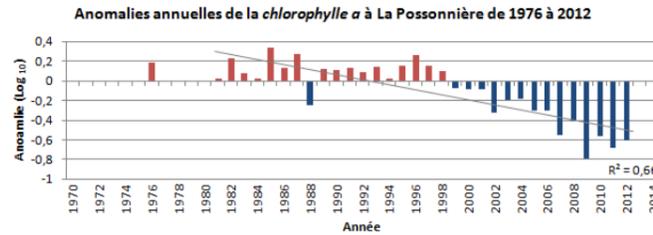
Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives



- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire



- Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

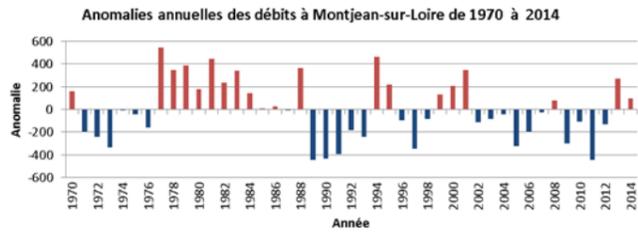
« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

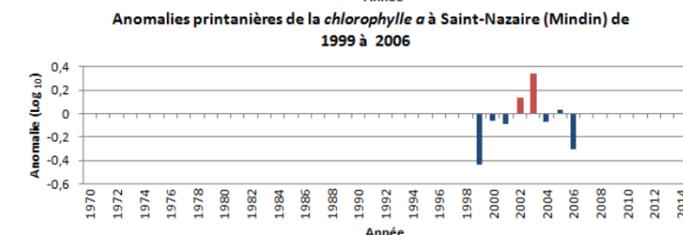
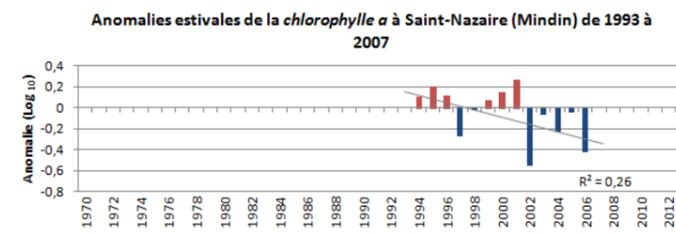
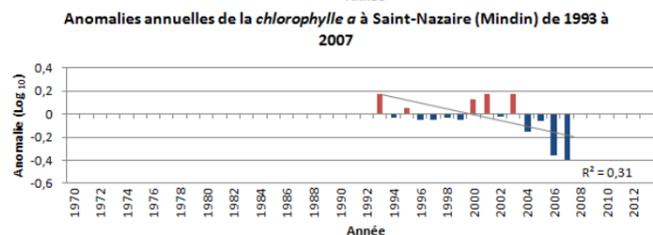
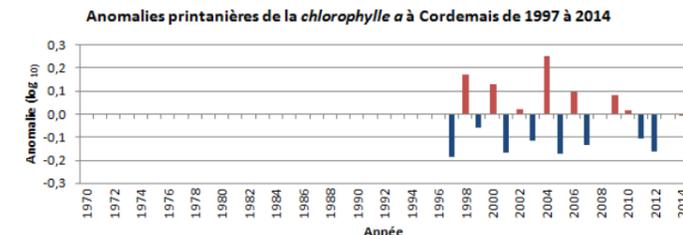
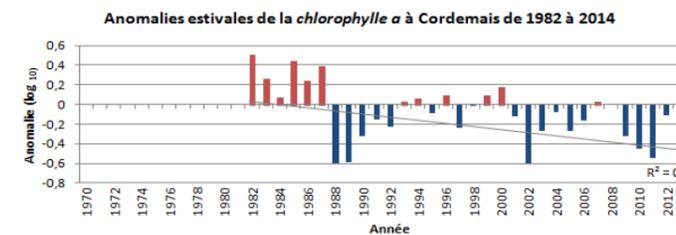
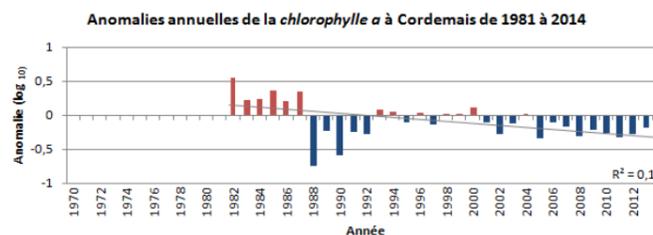
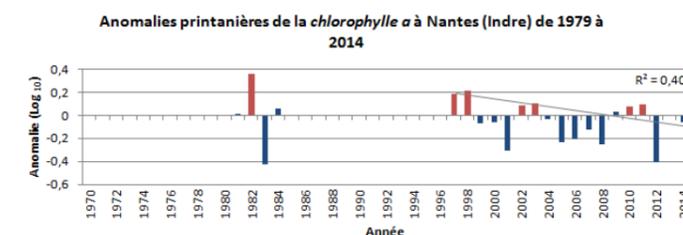
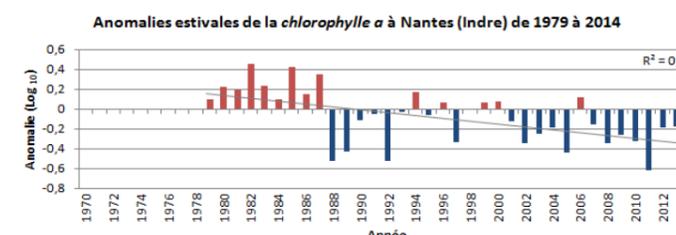
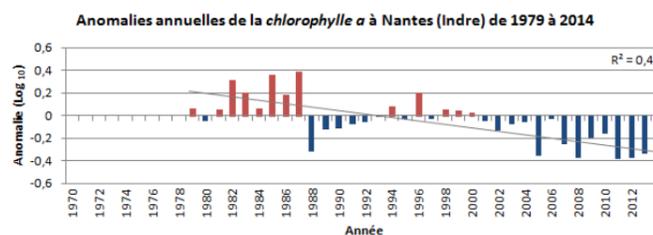
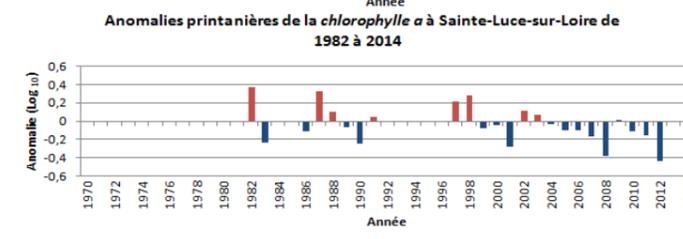
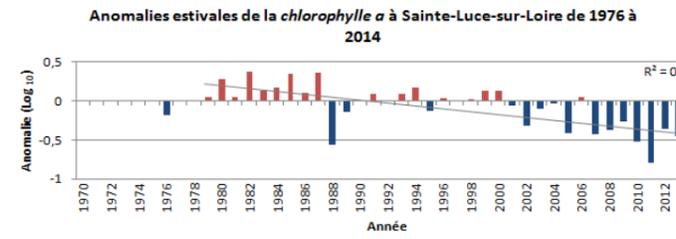
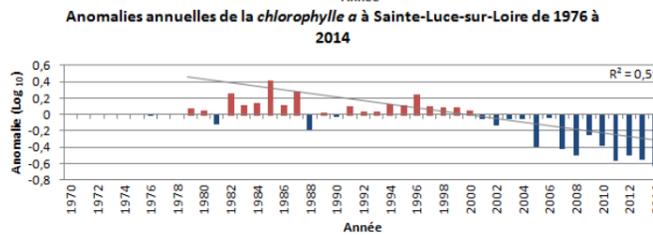
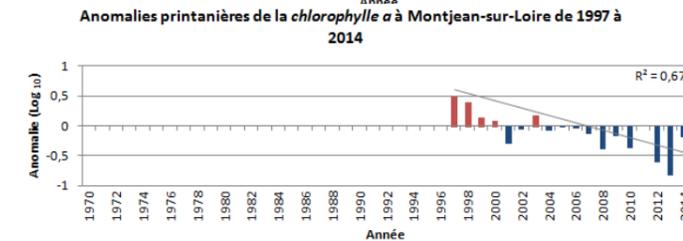
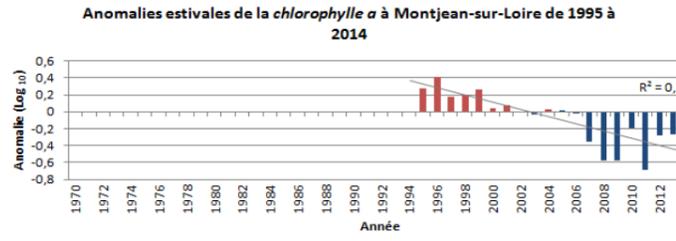
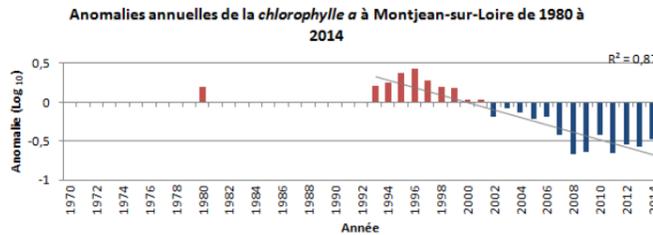
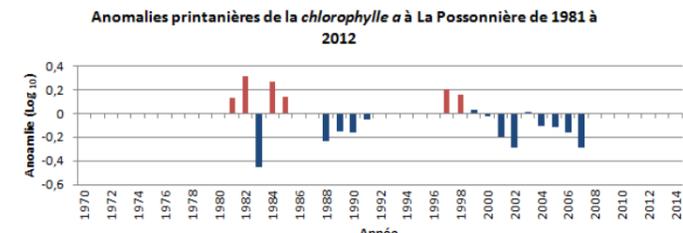
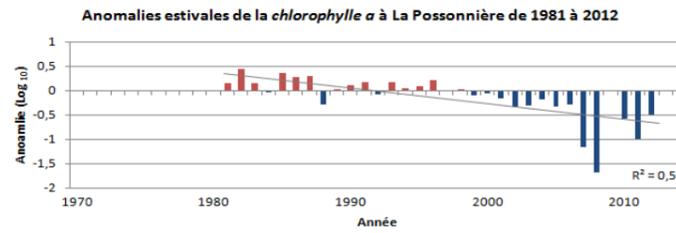
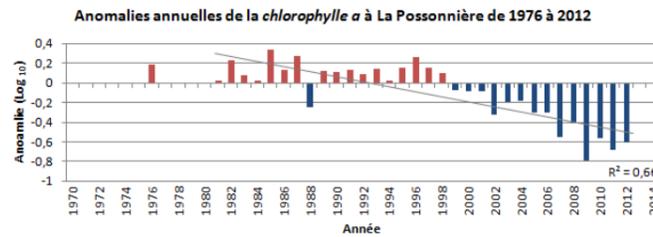
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et printanière (3 mois) pour la chlorophylle a exprimé en µg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

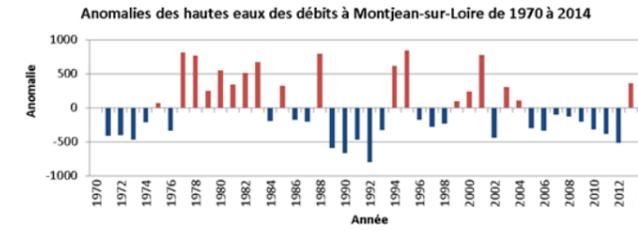
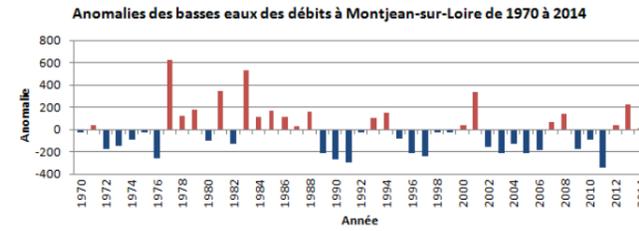
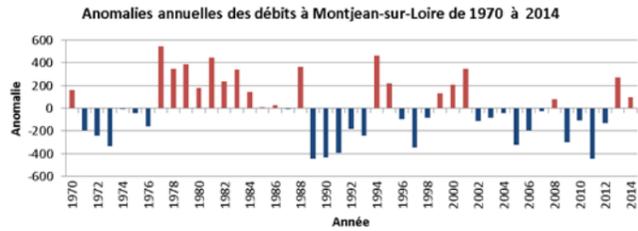
« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

« saison printanière » : Période de 3 mois allant de mars à mai.

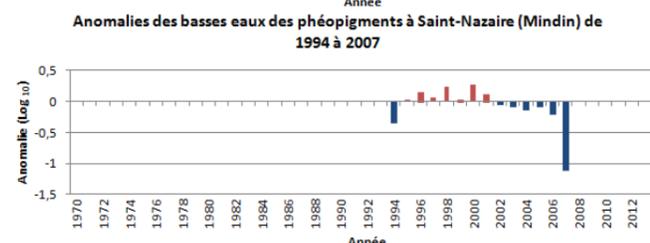
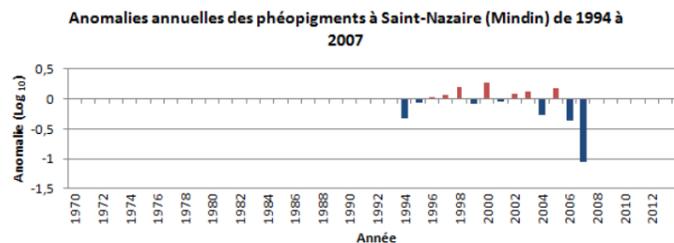
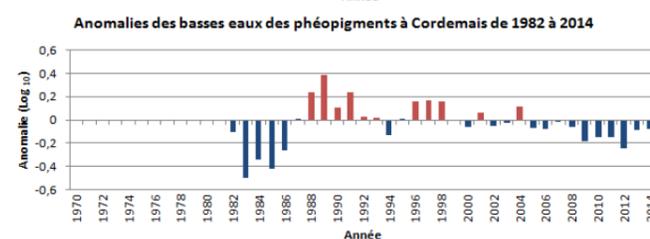
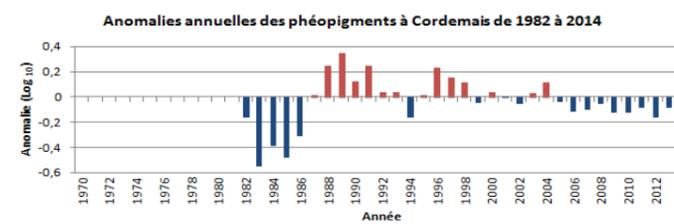
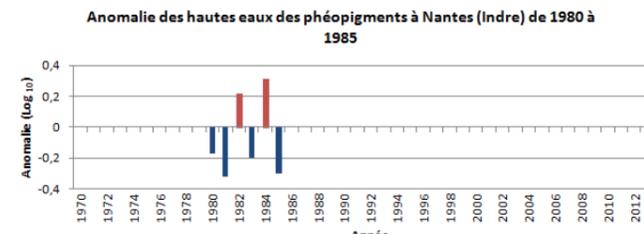
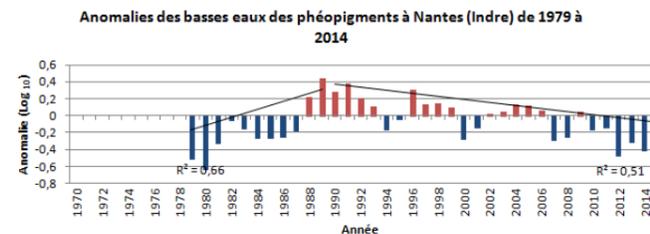
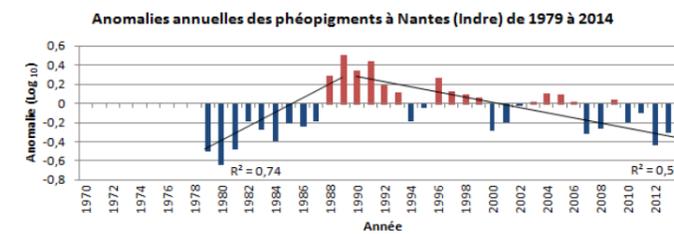
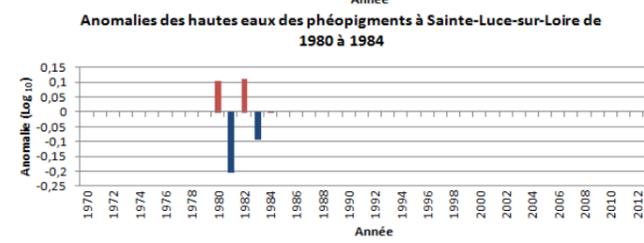
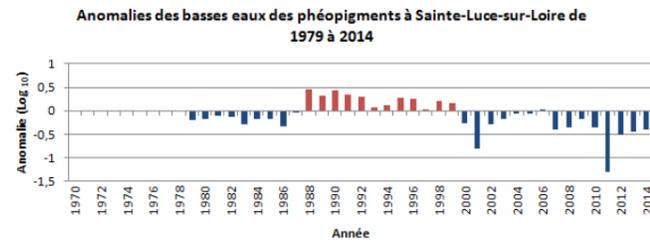
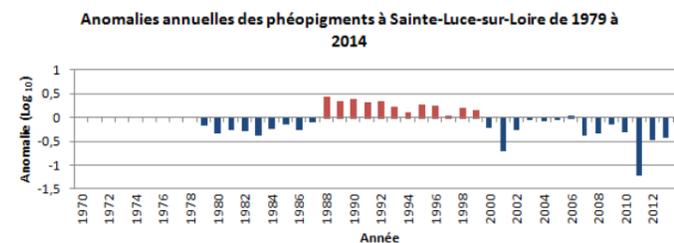
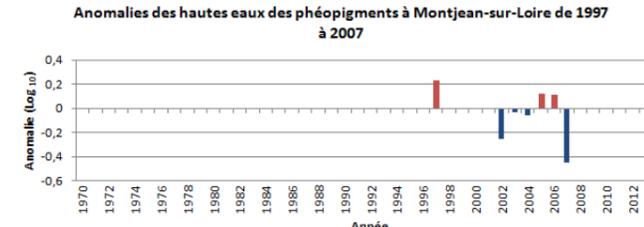
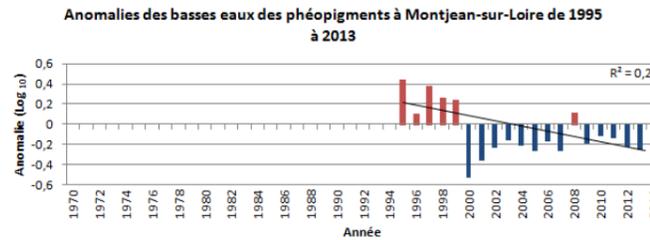
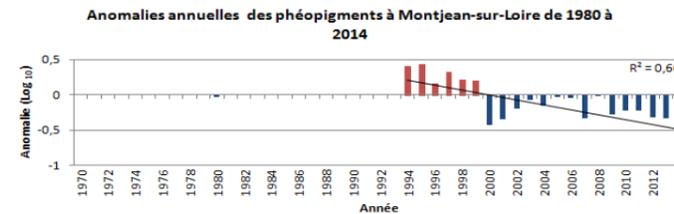
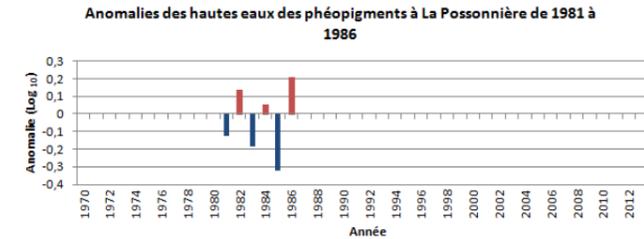
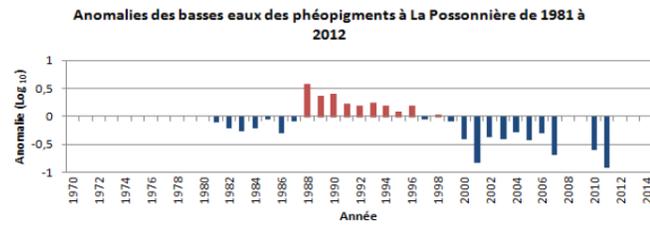
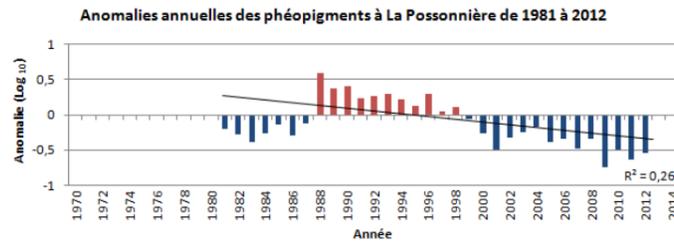
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

• **Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



• **Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6 mois) pour les**



Station de Cordemais
Absence de résultats

Station de Saint-Nazaire
Absence de résultats

Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

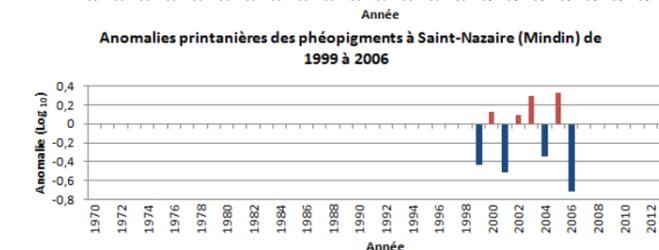
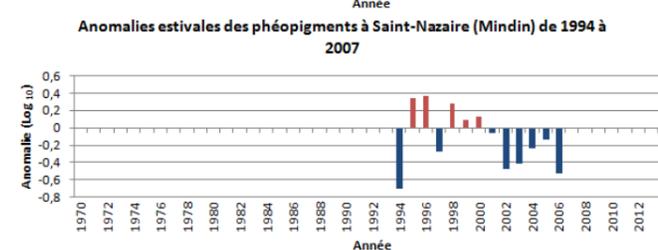
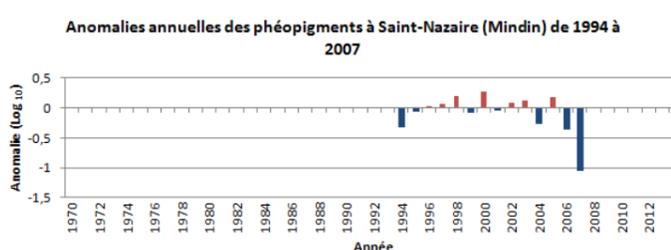
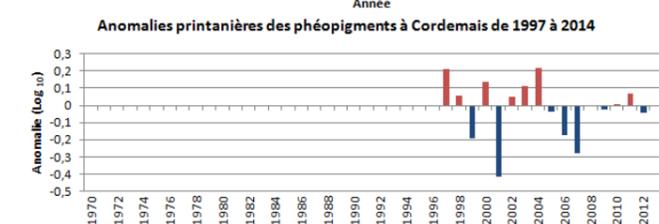
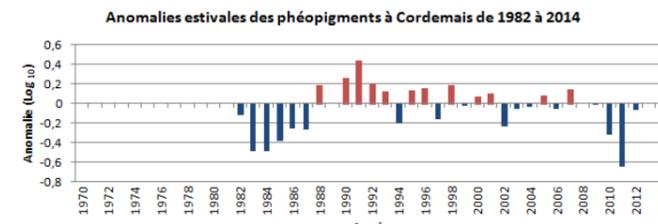
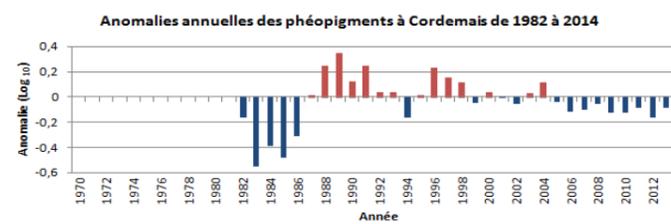
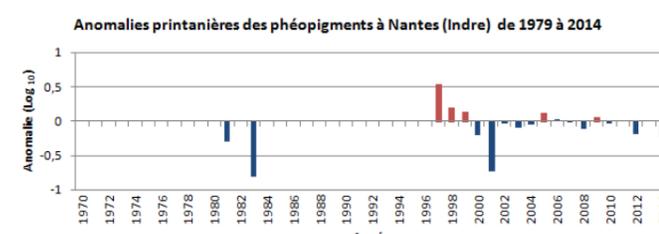
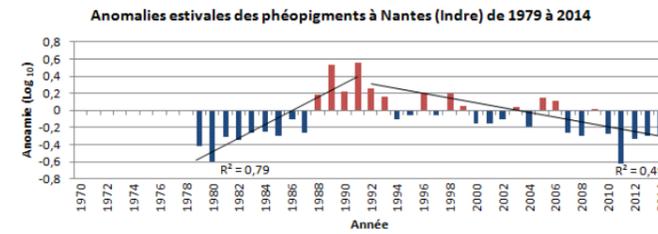
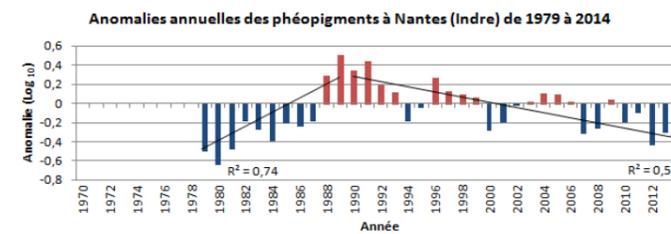
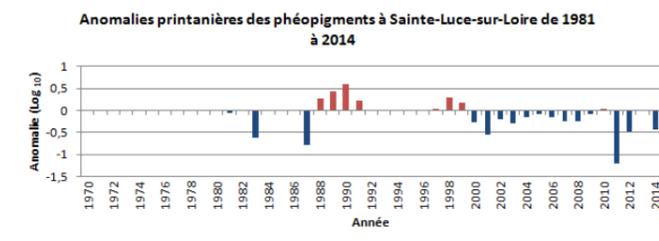
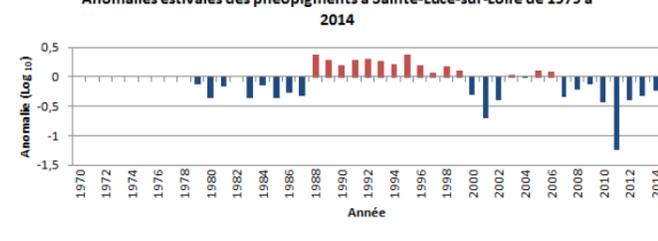
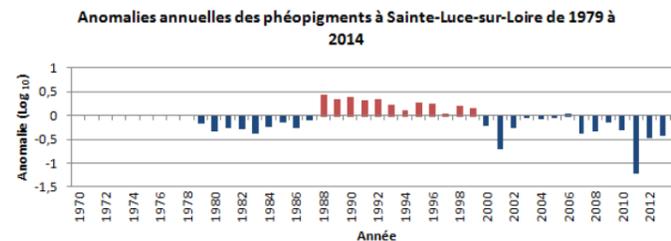
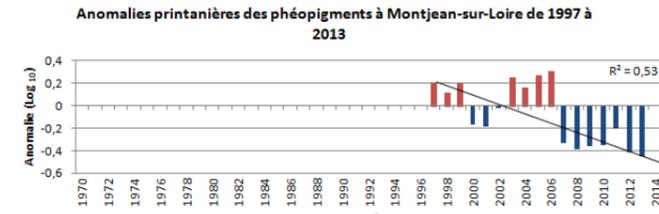
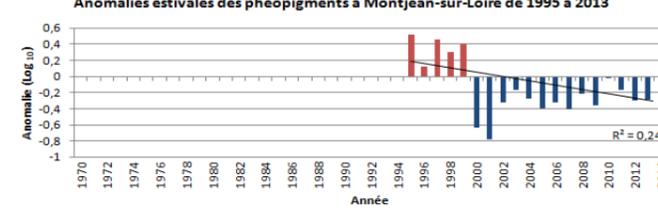
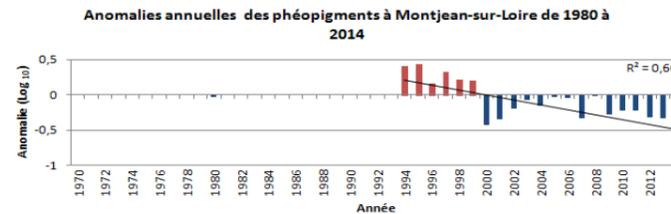
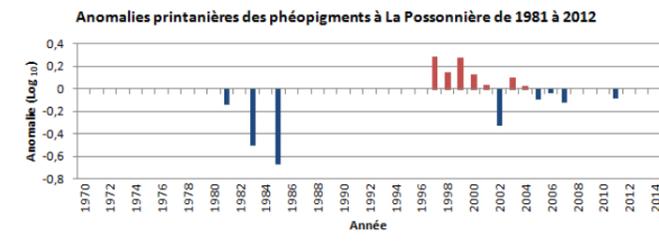
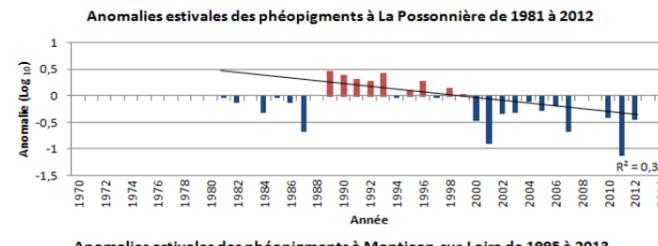
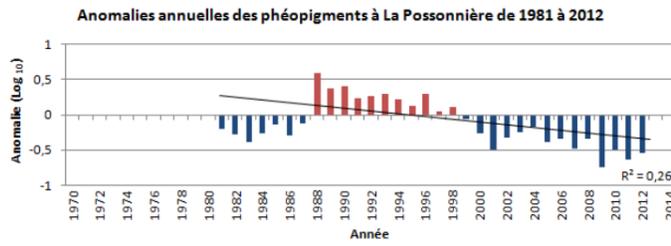
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et printanière (3 mois) pour les phéopigments exprimé en µg/L**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012 ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

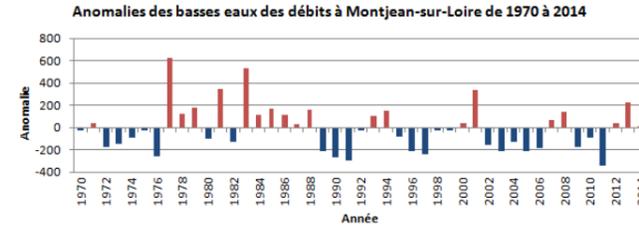
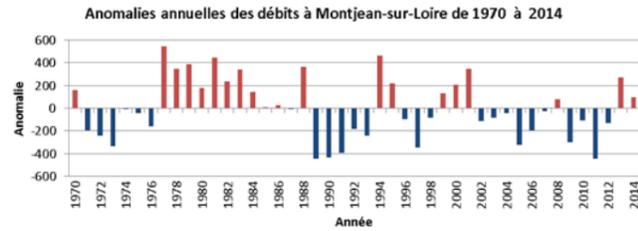
« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

« saison printanière » : Période de 3 mois allant de mars à avril

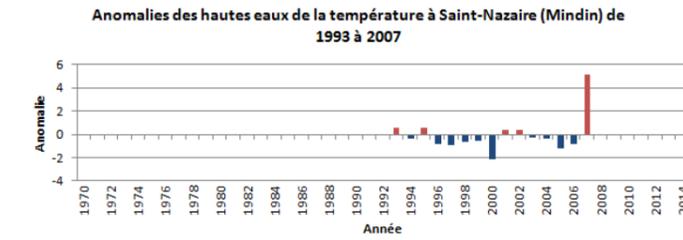
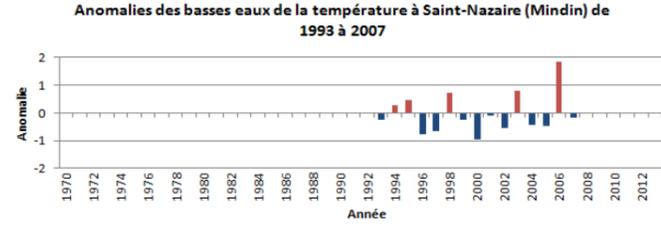
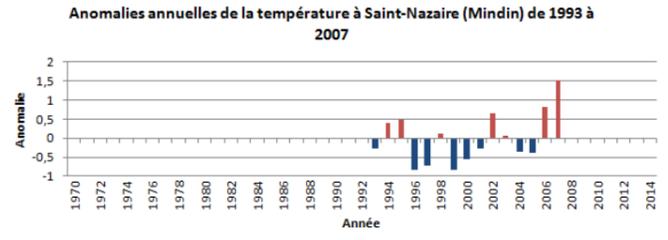
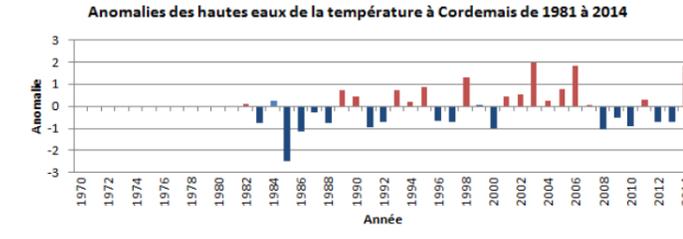
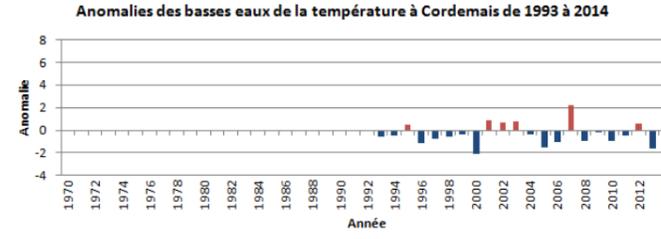
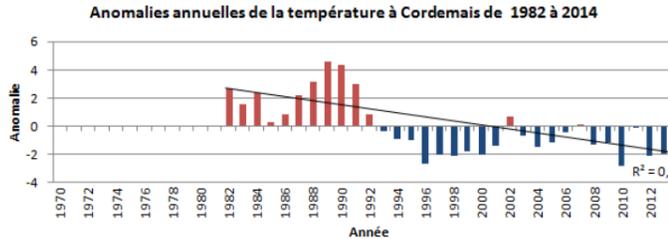
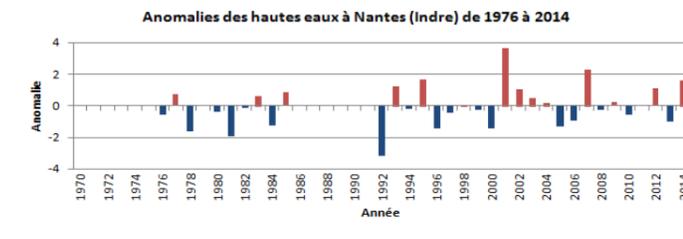
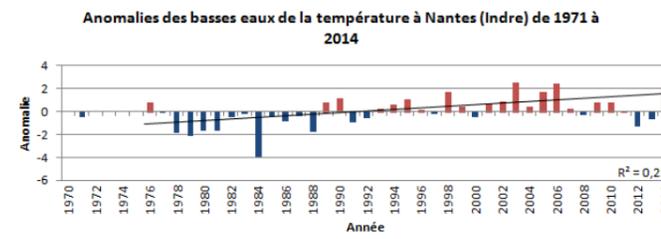
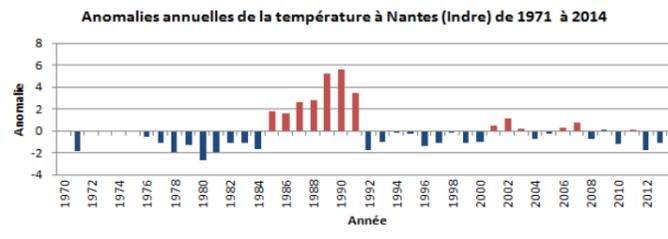
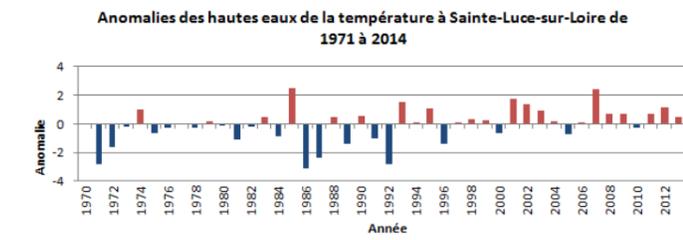
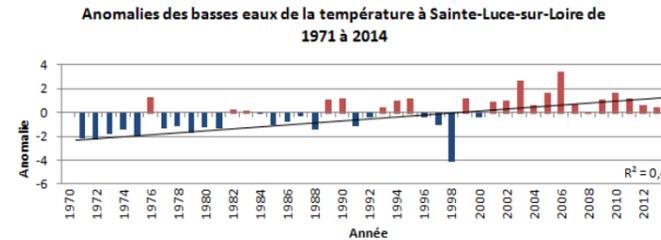
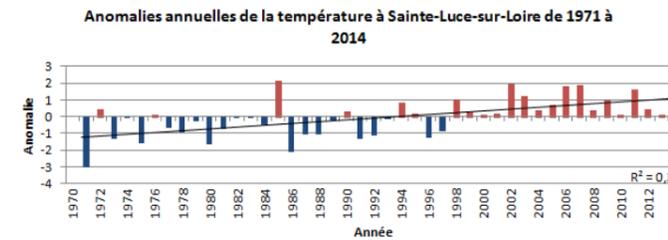
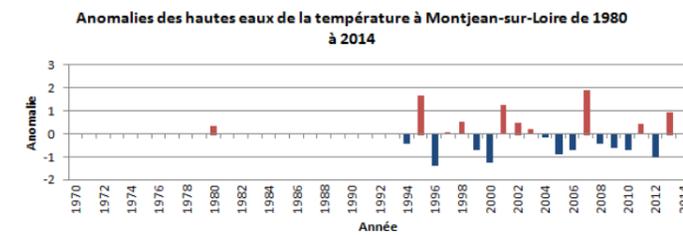
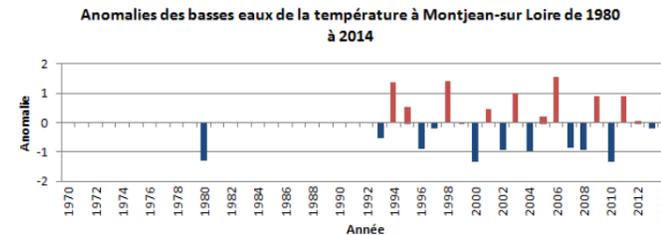
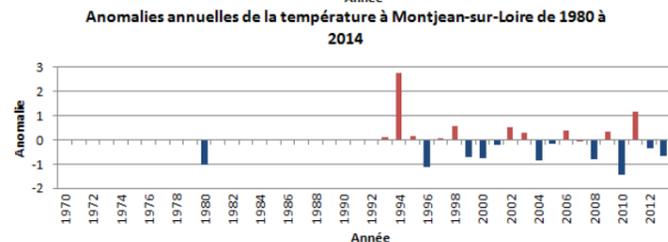
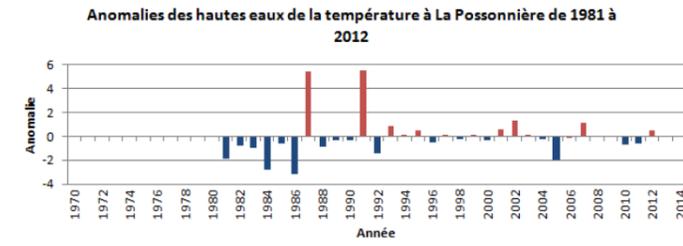
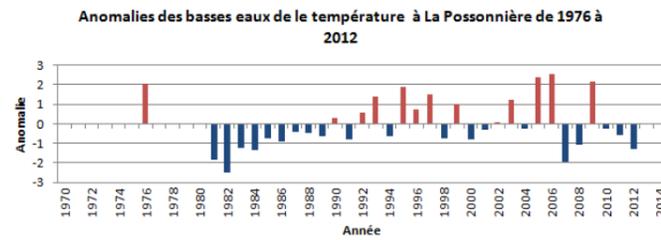
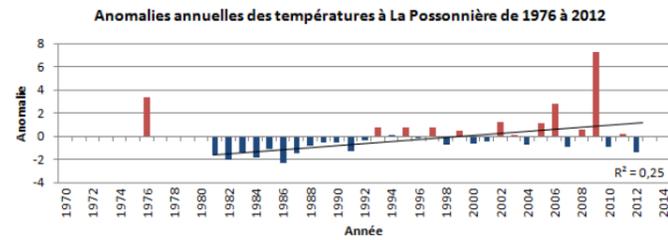
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période de hautes et basses eaux (6 mois) pour la température exprimé en °C**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « *ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012* ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

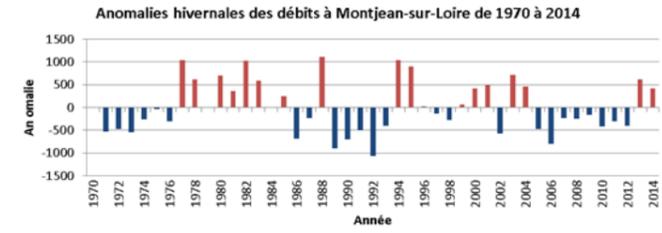
« Basses eaux » : Période de 6 mois allant de mai et octobre correspondant généralement à la période d'étiage.

« Hautes eaux » : Période de 6 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de mai à octobre. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

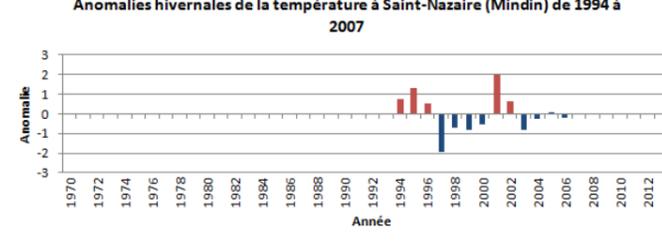
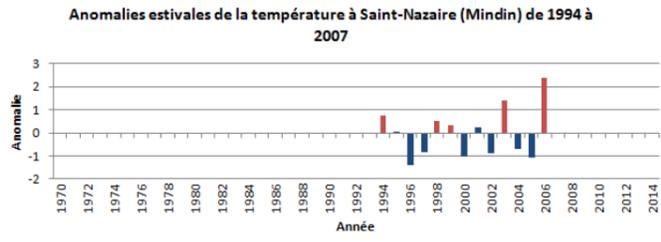
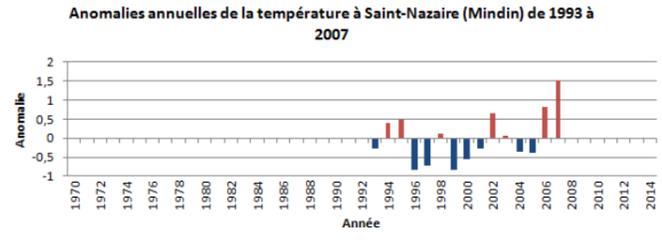
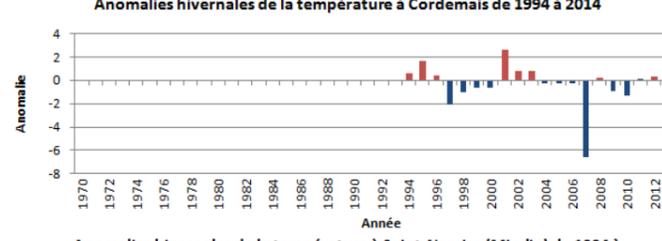
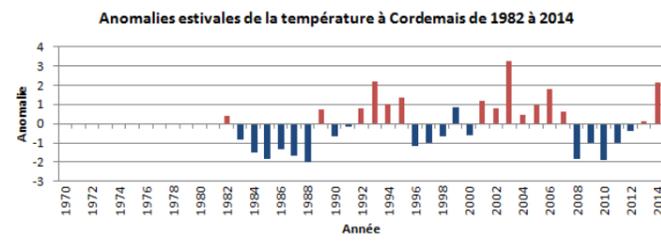
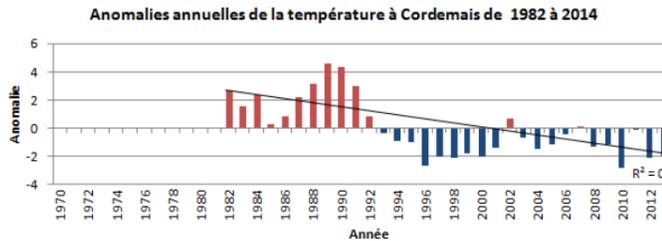
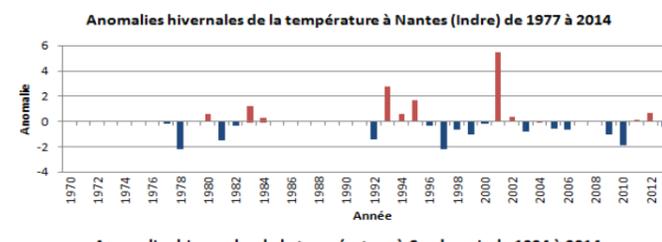
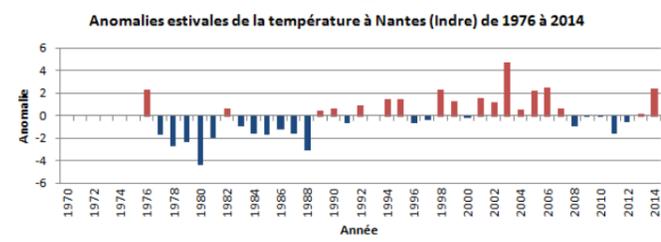
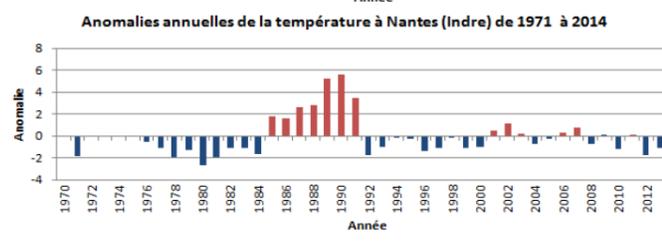
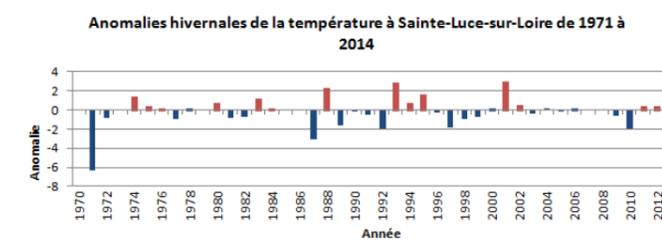
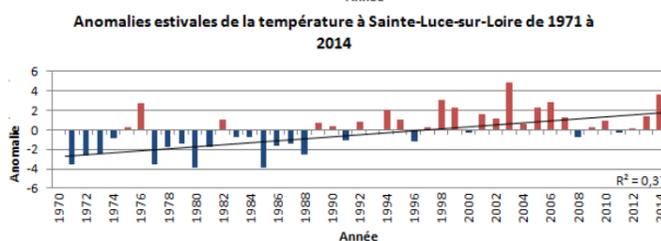
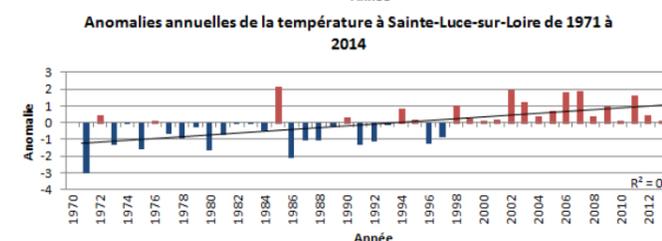
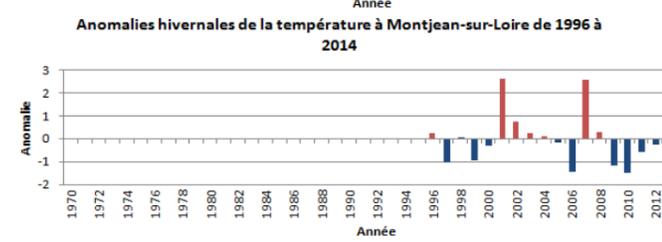
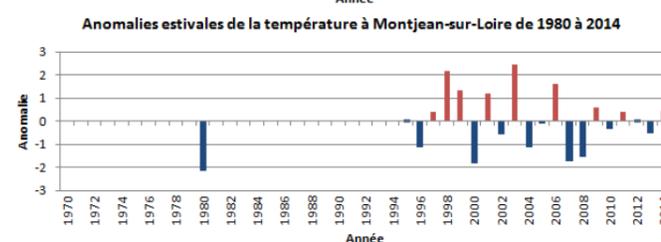
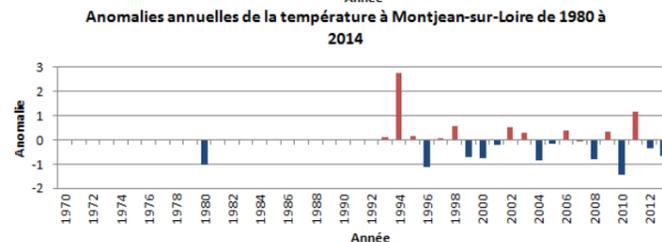
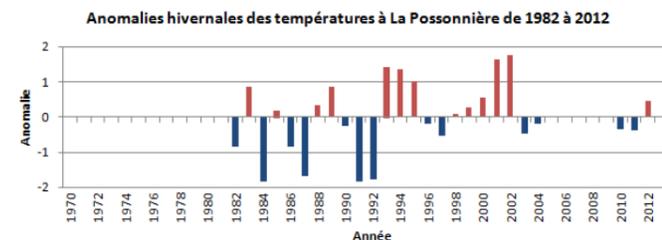
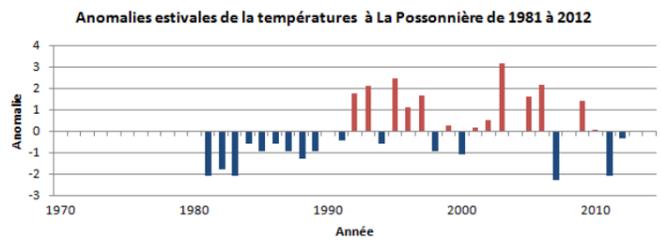
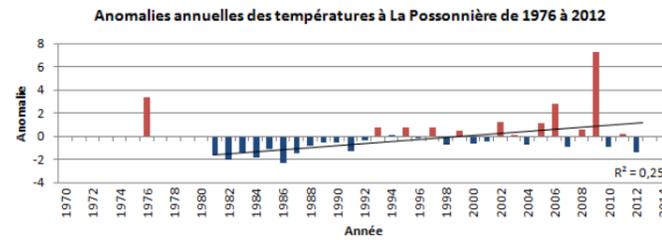
Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

- Evolution des débits de la Loire de 1970 à 2015 à la station de Montjean-sur-Loire**



- Evolution des concentrations annuelles et en période estivale et hivernale (3 mois) pour la température exprimé en °C**



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par T. O'Brien extraite de « *ICES phytoplankton and microbial Plankton status—Report 2009-2012* ».

L'évolution des débits à la station de Montjean-sur-Loire permettent d'observer les conditions hydrologique en Loire pour une année.

« saison estivale » : Période de 3 mois allant de juin à juillet correspondant généralement à la période sèche

« saison hivernale » : Période de 3 mois qui s'échelonne sur deux années et allant de décembre à février. La sélection de deux années successives permet d'observer, sans discontinuité, la période de crue

Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas)

Les courbes de tendances sont indiquées que si celles-ci sont significatives

Annexe 8 : Tableau synthétisant les « outliers » identifiés à l'aide des erreurs standardisés et leur devenir dans le modèle

Paramètre	Station	Outlier identifié	Médiane mensuelle associée	Validation		
C H O R O P H Y L L E A	La Possonnière	289	06/11/85	36	✓	
		16.4	30/07/87	70	✓	
		0.5	28/08/08	56	✓	
	Montjean	91	11/03/98	16	✓	
		66.2	01/04/03	23	✓	
	Sainte-Luce	6	07/11/94	28.5	✓	
		111	12/03/98	15	✓	
		122.5	23/08/06	60	✓	
	Nantes	8.97	04/05/83	52	✓	
		5	03/08/88	39.5	✓	
		5	06/07/89	48	✓	
		8	12/09/90	45	✓	
	Cordemais	7.2	03/06/08	58.2	✓	
		178	05/08/83	40	✓	
		3	01/10/87	21	✓	
		3	05/05/88	40	✓	
		6	03/08/88	40	✓	
	Saint-Nazaire	23	18/08/90	40	X	
5		04/03/99	2	X		
124.5		18/09/01	12	✓		
A M M O N I U M	La Possonnière	58.3	12/08/03	16	✓	
		0.03	06/02/85	0.14	✓	
		0.02	01/04/88	0.07	✓	
		0.31	01/06/89	0.095	✓	
		0.33	11/09/91	0.13	✓	
	Montjean	0.06	23/03/95	0.075	X	
		0.38	14/01/97	0.2	X	
		0.22	12/07/95	0.05	✓	
	Cordemais	0.21	13/01/97	0.06	✓	
		0.13	07/05/97	0.04	✓	
		0.03	14/03/94	0.14	✓	
		0.05	12/09/95	0.095	X	
	Saint-Nazaire	0.1	12/03/01	0.14	X	
		0.04	15/05/06	0.125	✓	
		0.04	12/06/06	0.125	✓	
	N I T R A T E	La Possonnière	0.29	30/08/96	0.18	X
			0.1	08/08/90	5.4	✓
		Montjean	0.2	07/08/91	5.4	✓
3.3			02/10/96	9.9	✓	
6.2			21/07/98	6.12	X	
1.8			12/08/98	5.45	✓	
14.2			23/10/06	9.9	X	
23.7			26/01/09	18.1	X	
29.3			20/01/09	18.1	X	
3.5			01/09/05	6.7	X	
Sainte-Luce		2.2	05/07/06	6.2	✓	
		1.39	04/09/78	4.5	✓	
		1.49	01/07/82	5.8	✓	
		1.99	05/09/84	4.5	✓	
		6.28	04/05/87	9.5	X	
		0.5	11/08/93	3.89	✓	
		1	31/07/96	5.8	✓	
		1.4	25/07/06	5.8	✓	
Nantes	2.4	06/08/09	3.89	X		
	40.3	04/07/88	5.8	✓		
	4.5	07/07/93	5.58	X		
	1.99	04/09/84	5.6	✓		
Cordemais	1.59	03/09/87	5.6	✓		
	1.1	11/08/93	4.3	✓		
	7.96	06/07/83	6.35	X		
	0.5	11/08/93	4.2	✓		
	2.3	06/08/89	4.2	X		
Saint-Nazaire	0.9	11/07/94	3	✓		
	0.5	31/07/96	3	✓		
	4.1	15/05/03	7.8	X		

N I T R I T E	La Possonnière	0.12	06/10/82	0.11	X
		0.11	10/05/84	0.11	X
		0.02	07/06/84	0.11	✓
		0.03	04/11/87	0.11	✓
		0.05	23/01/91	0.15	✓
		0.48	13/01/93	0.15	✓
		0.28	25/02/97	0.12	✓
		0.35	06/12/06	0.13	✓
		0.04	16/11/09	0.11	✓
		0.22	10/12/09	0.13	X
	Montjean	0.02	01/04/03	0.03	X
		0.15	26/05/03	0.055	✓
		0.02	13/05/04	0.055	✓
		0.03	14/05/05	0.055	✓
		0.02	28/08/07	0.05	✓
		0.16	14/01/08	0.07	X
		0.07	14/05/13	0.055	✓
		0.1	24/01/10	0.07	X
Nantes	0.28	10/12/03	0.08	✓	
Cordemais	0.19	04/09/84	0.06	✓	
	0.59	03/07/00	0.1	✓	
Cordemais (suite)	0.03	26/08/02	0.09	✓	
	0.02	10/09/03	0.05	X	
Saint-Nazaire	0.03	05/10/09	0.07	X	
	0.22	16/11/93	0.05	✓	
	0.2	07/11/94	0.05	✓	
	0.16	09/01/96	0.14	X	
	0.18	07/10/98	0.05	✓	
	0.23	14/06/99	0.07	✓	
	0.02	03/07/96	0.1	✓	
Montjean	0.03	12/08/98	0.08	✓	
	0.06	07/09/98	0.11	X	
	0.04	05/17/06	0.1	✓	
	0.06	06/09/06	0.11	X	
	0.5	12/02/07	0.3	X	
	0.27	19/03/08	0.27	X	
	0.48	20/01/08	0.3	X	
	0.03	05/09/84	0.07	✓	
	Sainte-Luce	0.03	05/08/87	0.07	✓
		0.02	11/08/93	0.07	✓
0.015		02/07/96	0.09	X	
Nantes	0.336	15/11/12	0.2	X	
Cordemais	0.14	06/07/83	0.11	X	
	0.11	01/07/92	0.11	X	
	0.03	06/08/94	0.07	✓	
	0.08	23/07/98	0.11	✓	
	0.22	22/06/05	0.14	X	
	0.03	12/08/98	0.05	X	
Saint-Nazaire	0.1	21/07/03	0.05	X	
	0.08	12/07/94	0.05	X	
	0.06	02/10/96	0.1	X	
	0.09	05/08/97	0.05	X	
P H O S P H A T E	La Possonnière	0.37	03/07/03	0.05	✓
	Montjean	0.03	28/09/99	0.08	X
		0.46	26/10/99	0.16	✓
		0.02	23/08/01	0.07	✓
	Sainte-Luce	0.23	04/03/02	0.23	X
		0.05	09/05/94	0.075	✓
		0.04	09/08/95	0.08	X
	Nantes	0.21	03/03/99	0.145	X
0.3		02/07/96	0.18	X	
0.02		15/05/07	0.11	✓	
0.03	25/03/09	0.175	✓		
SiO ₃	Montjean	2.7	17/04/03	9.2	✓
	6.2	22/04/14	9.2	X	

Annexe 9 : Tableau synthétisant les changements de niveaux (tendance) identifiés par modélisation linéaire dynamique et leur devenir dans le modèle

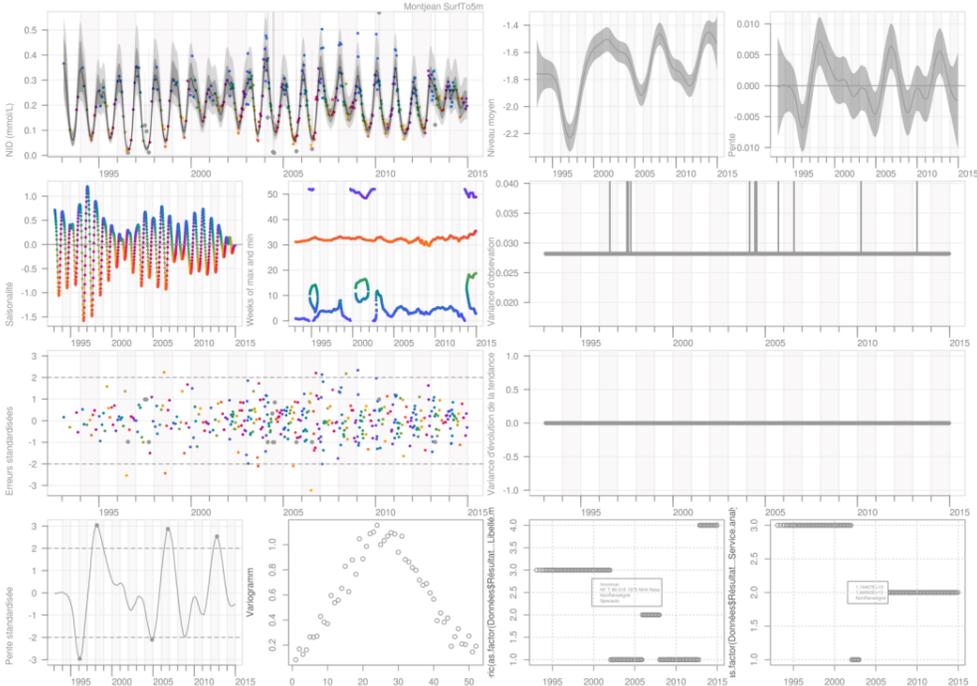
Paramètre	Station	Changements de niveaux proposés par le modèle	Justification	Changement effectué
C H O R O P H Y L L E	La Possonnière	02/04/07	X	
		26/10/99	X	
	Montjean	10/10/06	X	
		06/07/83	X	
	Sainte-Luce	03/12/87	X	
		09/05/94	Alternance de données DDTM et AELB	01/04/92 07/10/98
		26/10/00	Changement de laboratoire d'analyse	12/03/01 16/10/01
		26/09/07	Données CG	22/03/07
		06/07/83	X	
	Nantes	01/10/87	X	
		02/09/92	Alternance des données DDTM et AELB	03/06/92 16/10/97
		12/09/07	Données CG	22/03/07
	Cordemais	01/10/87	Alternances des données DDTM et AELB	17/06/92 16/10/01
		02/09/92	X	
		05/07/01	X	
	Saint-Nazaire	23/03/04	X	
		17/11/88	X	
A M M O N I U M	La Possonnière	09/03/94	X	
		24/07/06	X	
		18/04/05	X	
	Montjean	26/07/06	X	
		03/02/09	X	
	Sainte-Luce	01/10/79	X	
	Nantes	01/07/80	X	
		03/10/85	X	
		14/02/94	Alternance des données DDTM et AELB	19/02/92 05/06/97
		20/01/12	X	
	Cordemais	02/05/96	X	
23/02/04		X		
Saint-Nazaire	08/09/98	X		
N I T R A T E	La Possonnière	18/11/92	X	
		04/11/98	X	
	Montjean	01/06/04	X	
		10/10/06	X	
		06/04/11	X	
		12/11/12	X	
	Sainte-Luce	01/06/89	X	
		15/10/93	Alternance des données DDTM et AELB	18/02/92 08/09/98
		05/11/98	X	
	Nantes	04/05/87	X	
15/10/93		Alternance des	18/01/92	

N I T R I T E	Cordemais	03/08/88	X	données DDTM et AELB	05/06/97
		15/10/93	Alternance des données DDTM et AELB	19/02/92 07/10/98	
		05/11/98	X		
	Saint-Nazaire	15/05/03	X		
		05/08/87	X		
	La Possonnière	31/07/07	X		
		23/10/02	X		
	Montjean	01/04/04	Changement de laboratoire d'analyse	30/01/02 19/12/02	
		11/06/08	X		
		01/07/80	X		
Nantes	10/10/90	X			
	14/09/04	Données AELB	20/04/04		
	08/11/07	Données CG	22/03/07		
	20/01/12	X			
Cordemais	19/02/92	Alternance de données DDTM et AELB	19/02/92 07/10/98		
	16/12/97	X			
	12/08/03	X			
	25/03/07	Données CG	25/03/07		
	14/06/14	X			
Cordemais (suite)	07/10/98	X			
	01/07/05	X			
N I D	La Possonnière	04/11/87	X		
		04/11/98	X		
		01/06/04	X		
		10/10/06	X		
	Sainte-Luce	06/04/11	X		
		12/11/12	X		
	Sainte-Luce	05/11/98	Données DDTM	07/10/98 12/11/03	
		04/05/87	X		
	Nantes	04/11/92	Alternance de données DDTM et AELB	18/01/92 15/06/97	
		03/08/88	X		
Cordemais	25/11/92	Alternance de données DDTM et AELB	19/02/92 21/06/01		
	05/11/98	X			
	15/05/03	X			
P H O S P H A T E	La Possonnière	20/07/04	X		
		28/06/07	X		
	Sainte-Luce	28/03/02	X		
	Nantes	22/03/07	Données CG	22/03/07	
		18/02/03	X		
Cordemais	20/01/12	X			
	18/03/03	Changement de fraction	08/01/03		
SiO ₃	Montjean	12/11/12	X		

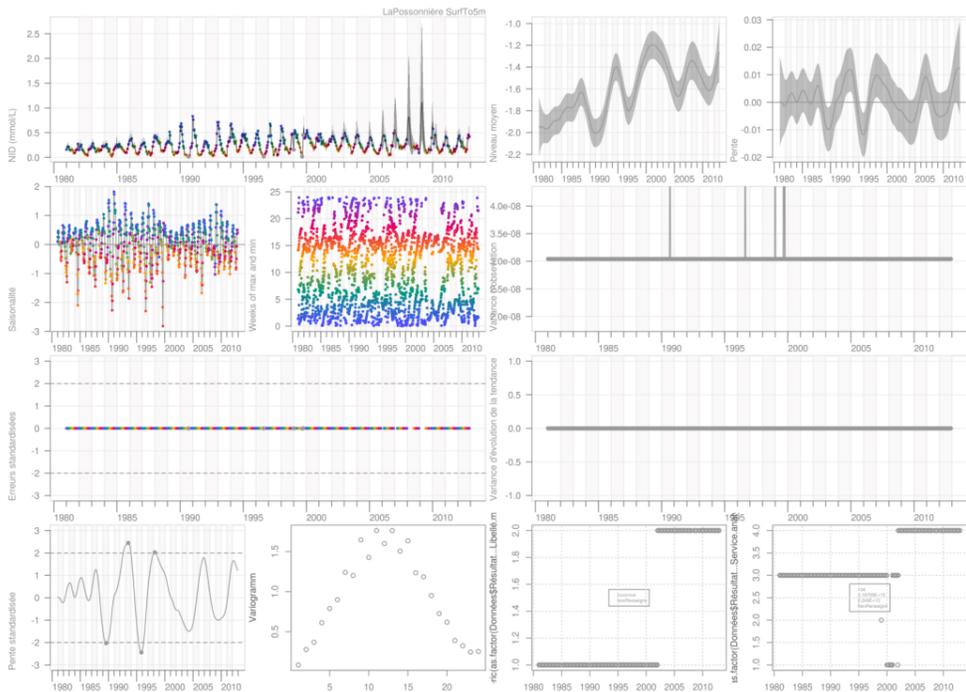
Annexe 10 : Synthèse des résultats obtenus par le DLM

- **Page 1** : Synthèse des résultats du modèle linéaire dynamique (DLM) selon la méthodologie Pétris (2010) pour l'azote inorganique dissous ou « dissolved inorganic nitrogen » DIN pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire.
- **Page 2** : Synthèse des résultats du modèle linéaire dynamique (DLM) selon la méthodologie Pétris (2010) pour les nitrates pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire.
- **Page 3** : Synthèse des résultats du modèle linéaire dynamique (DLM) selon la méthodologie Pétris (2010) pour l'ammonium pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire.
- **Page 4** : Synthèse des résultats du modèle linéaire dynamique (DLM) selon la méthodologie Pétris (2010) pour les phosphates pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire.
- **Page 5** : Synthèse des résultats du modèle linéaire dynamique (DLM) selon la méthodologie Pétris (2010) pour le phosphore total pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire.
- **Page 6** : Synthèse des résultats du modèle linéaire dynamique (DLM) selon la méthodologie Pétris (2010) pour les silicates pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire.
- **Page 7** : Synthèse des résultats du modèle linéaire dynamique (DLM) selon la méthodologie Pétris (2010) pour la chlorophylle *a* pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire.
- **Page 8** : Synthèse des résultats du modèle linéaire dynamique (DLM) selon la méthodologie Pétris (2010) pour le débit pour les 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire.

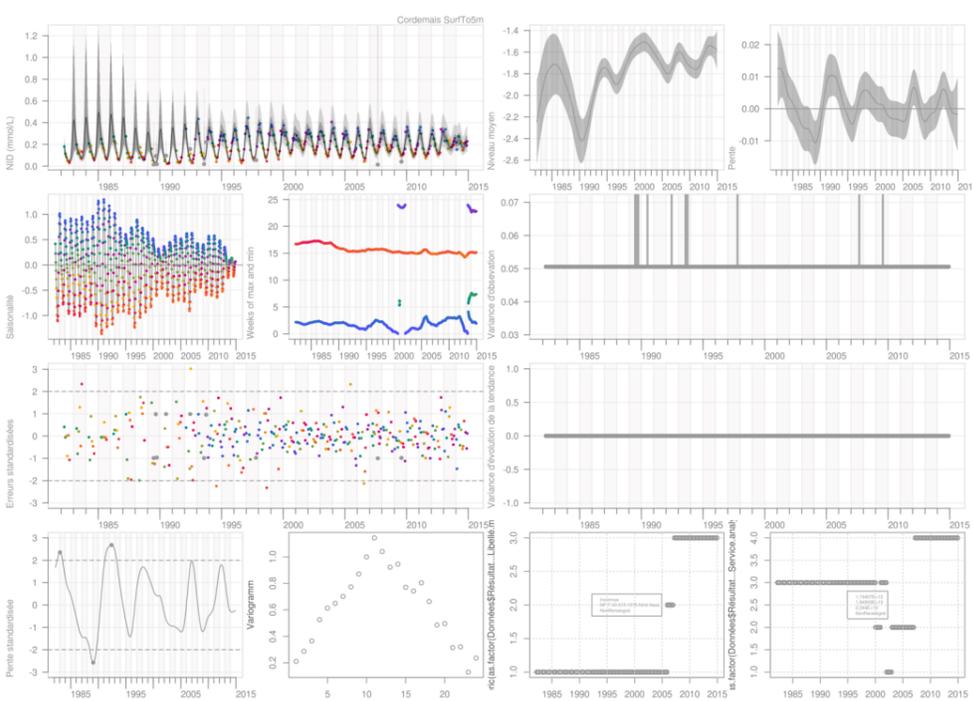
Montjean-sur-Loire



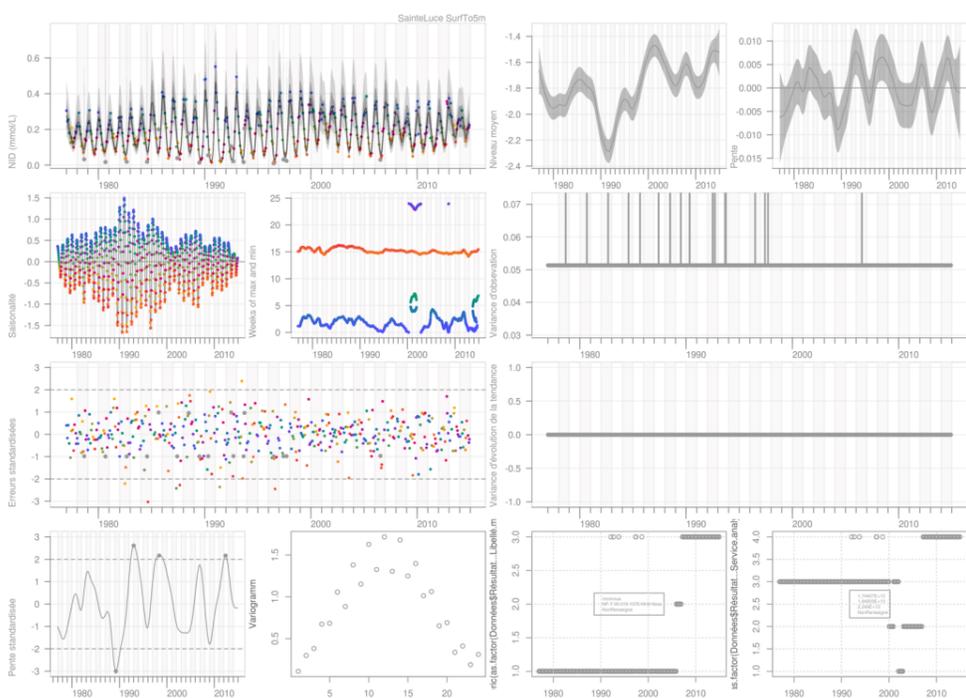
La Possonnière



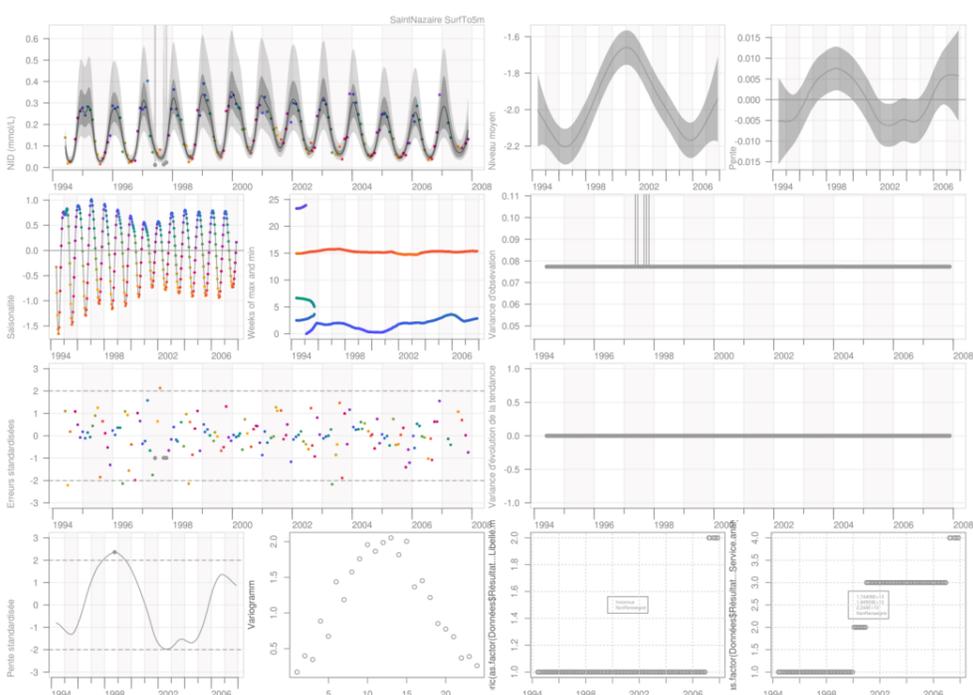
Cordemais



Sainte-Luce-sur-Loire



Saint-Nazaire (Mindin)



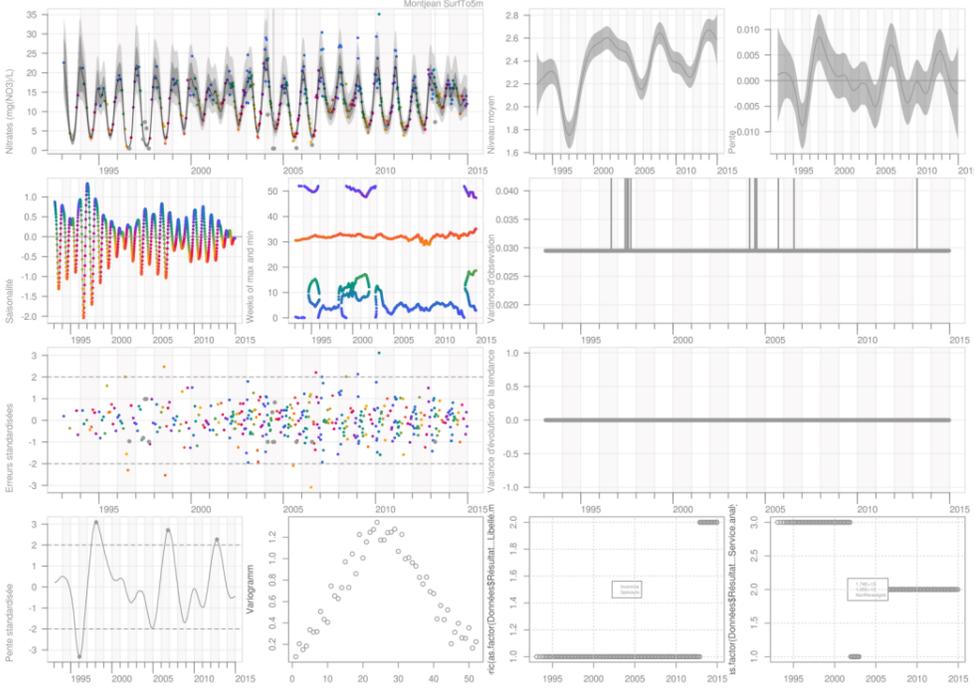
Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par Pétris & al., extrait de « An package for dynamic linear models ». Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas puis de gauche à droite)

Comprendre et exploiter les résultats :

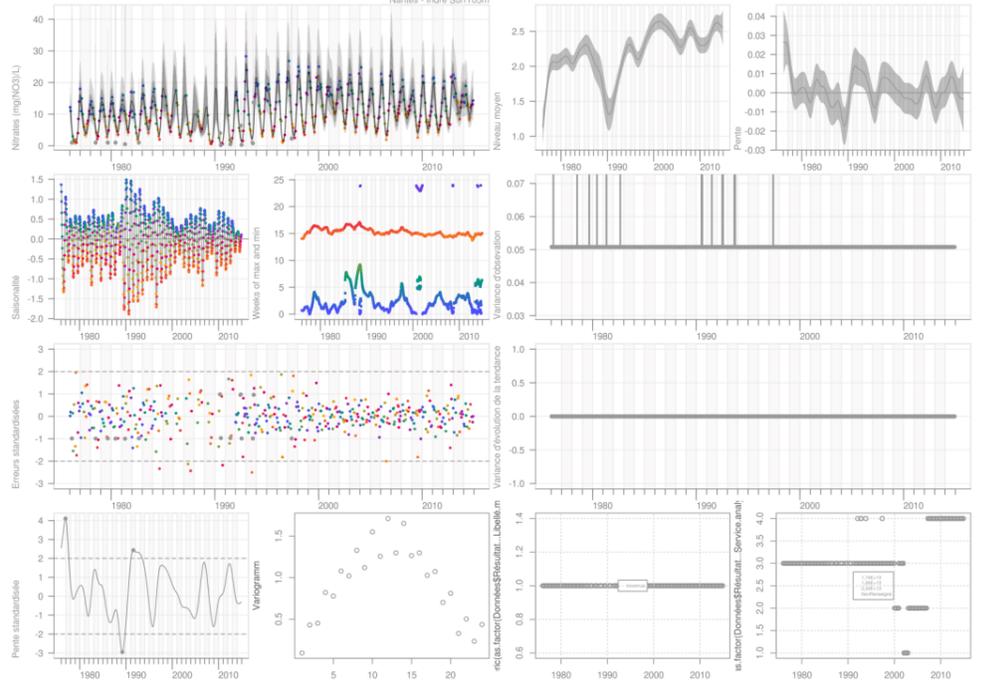
1 : Observation de l'enveloppe de confiance à 95% du signal dit sous-jacent dit « inobservable » ; 2 : Observation de la saisonnalité ; 3 : Observation des semaines où une valeur maximale ou minimale est atteinte ; 4 : Erreurs standardisées et leur enveloppe de confiance ; 5 et 6 : Pente et nuage de point des valeurs standardisées ; 7 : Niveau moyen des valeurs et enveloppe de confiance à 95% associée ; 8 : Pente du niveau moyen et enveloppe de confiance à 95% associée ; 9 : Variance d'observation ; 10, 11 et 12 : Ruptures de pente détectées par le modèle

1	7	8
2	3	9
4	10	
5	6	11
		12

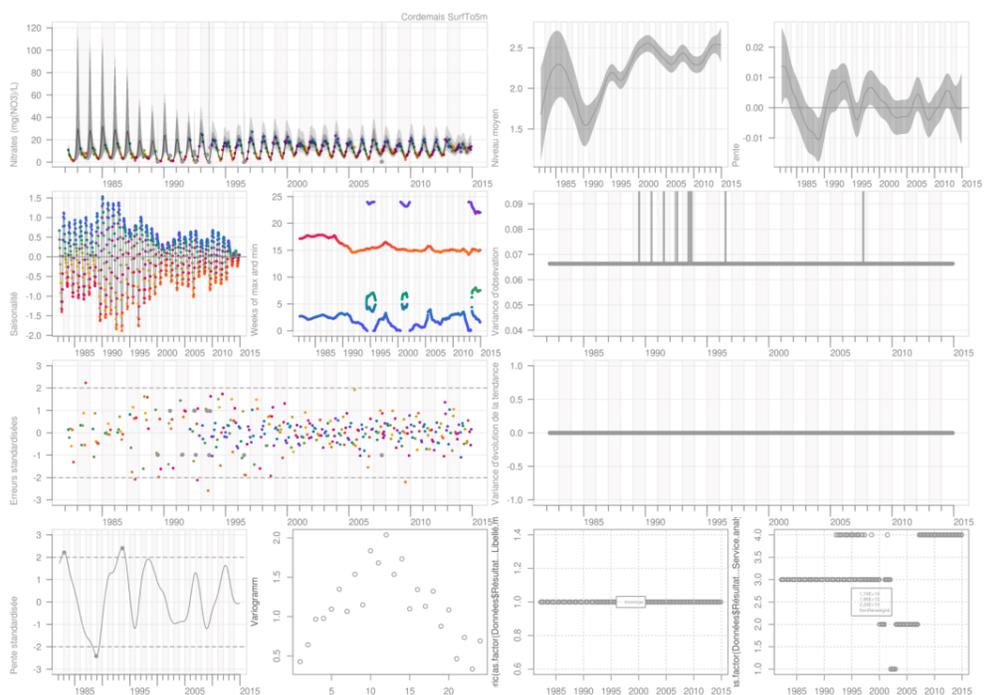
Montjean-sur-Loire



Nantes (Indre)



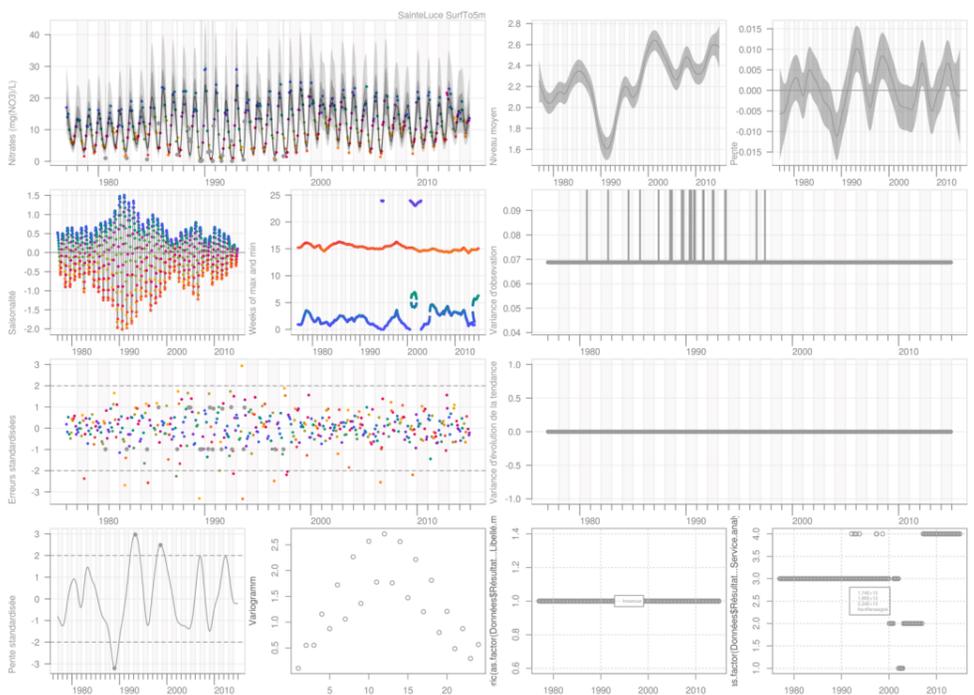
Cordemais



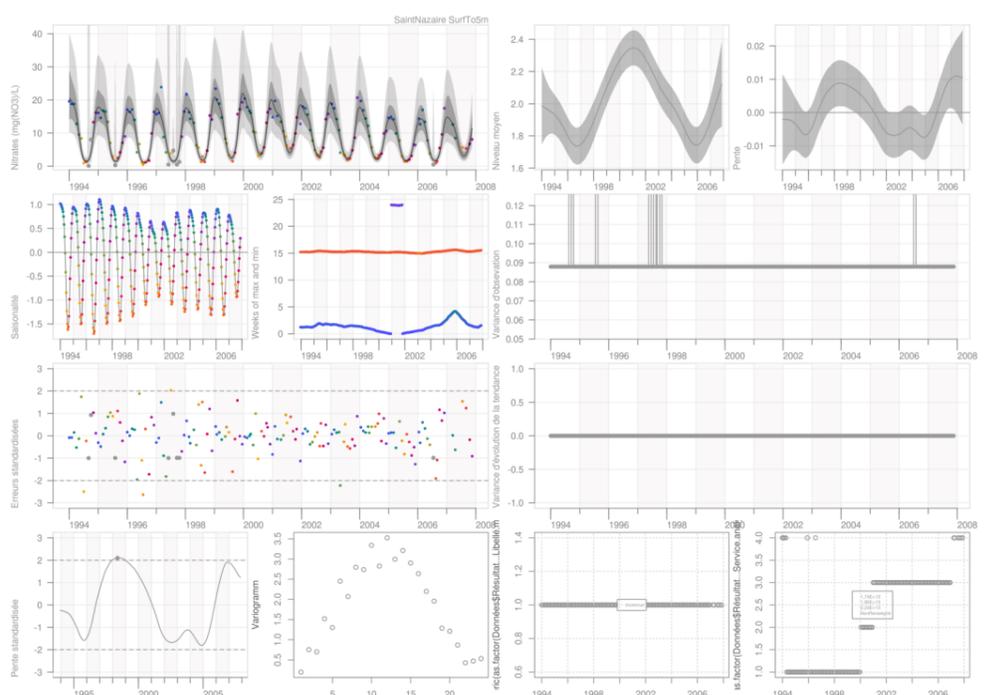
Station de La Possonnière

Absence de résultats

Sainte-Luce-sur-Loire



Saint-Nazaire (Mindin)



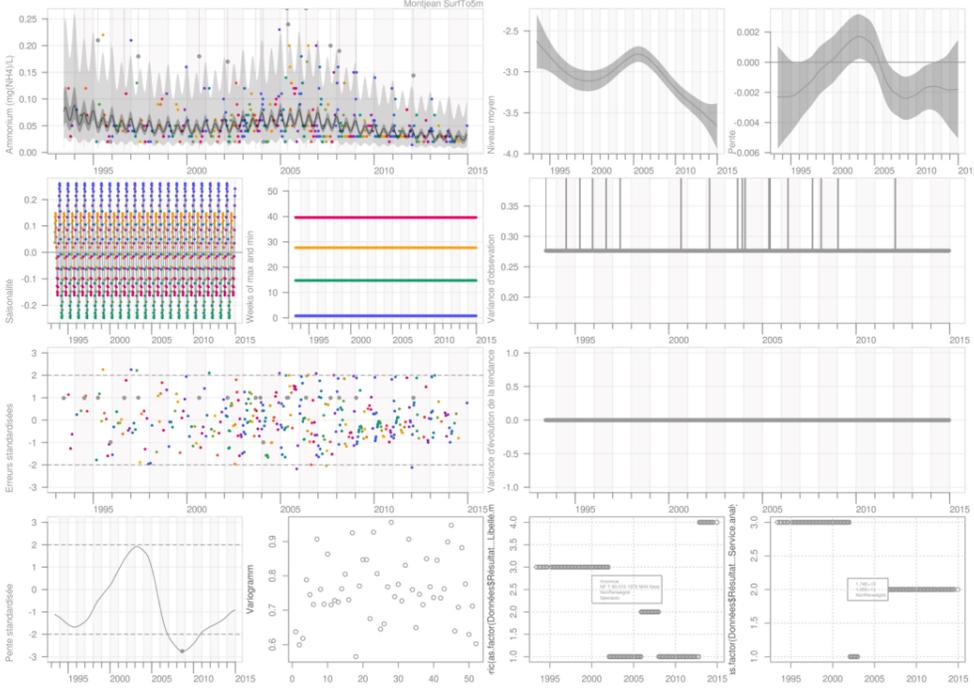
Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par Pétris & al., extrait de « An package for dynamic linear models ». Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas puis de gauche à droite)

Comprendre et exploiter les résultats :

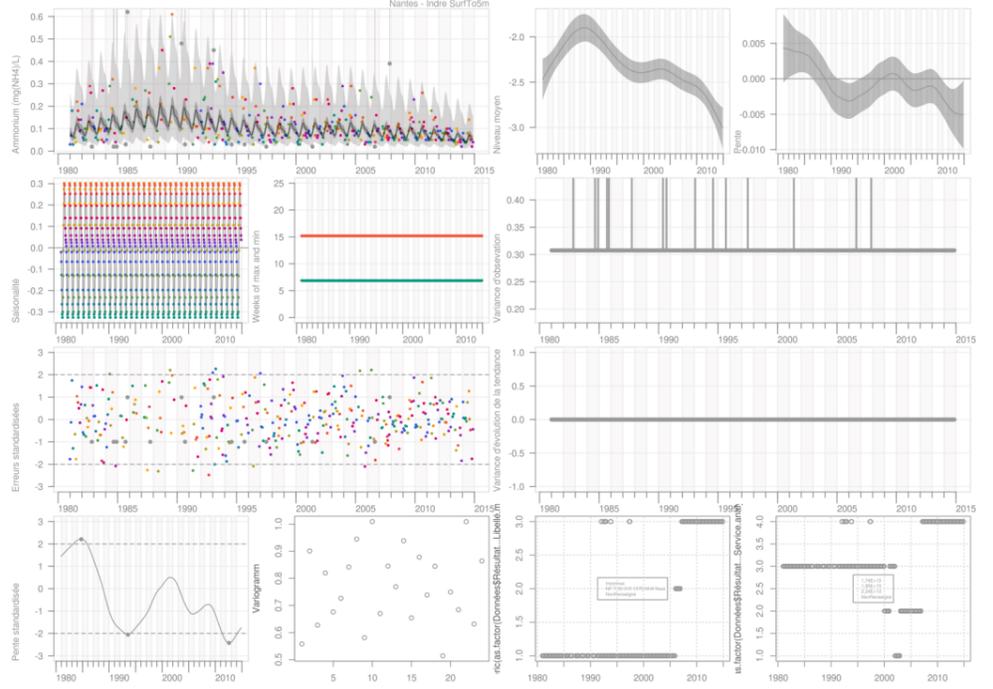
- 1 : Observation de l'enveloppe de confiance à 95% du signal dit sous-jacent dit « inobservable » ;
- 2 : Observation de la saisonnalité ;
- 3 : Observation des semaines où une valeur maximale ou minimale est atteinte ;
- 4 : Erreurs standardisées et leur enveloppe de confiance ;
- 5 et 6 : Pente et nuage de point des valeurs standardisées ;
- 7 : Niveau moyen des valeurs et enveloppe de confiance à 95% associée ;
- 8 : Pente du niveau moyen et enveloppe de confiance à 95% associée ;
- 9 : Variance d'observation ;
- 10, 11 et 12 : Ruptures de pente détectées par le modèle

1	7	8
2	3	9
4	10	
5	6	11
		12

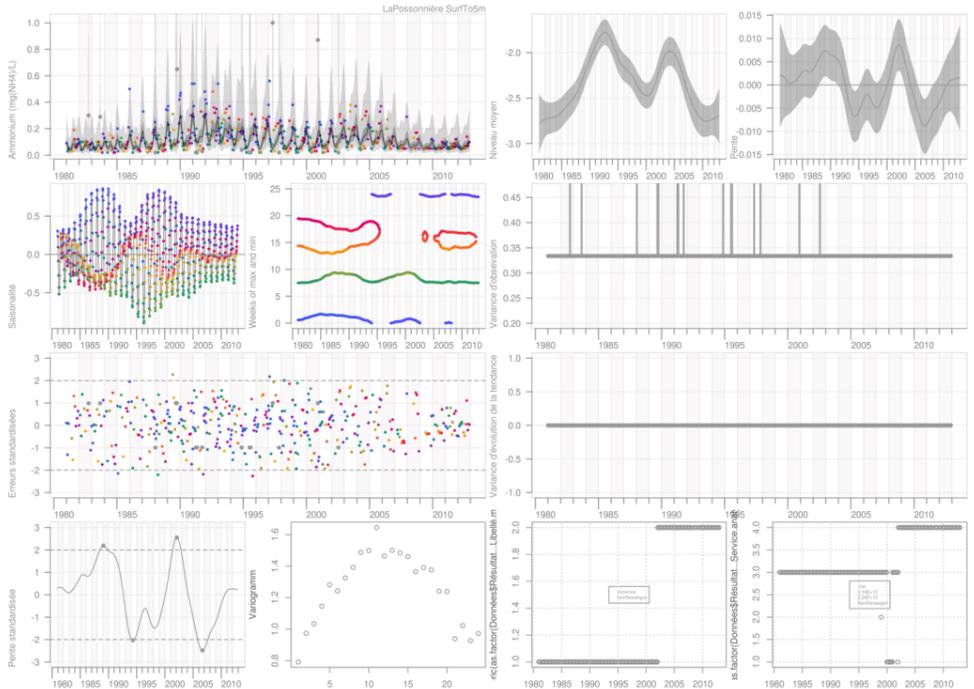
Montjean-sur-Loire



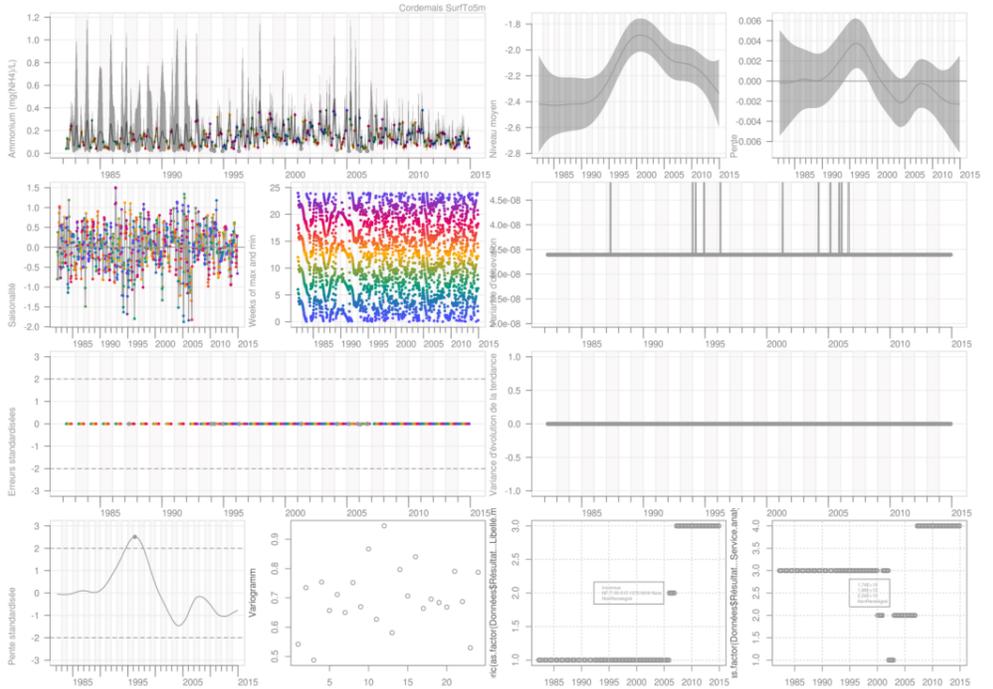
Nantes (Indre)



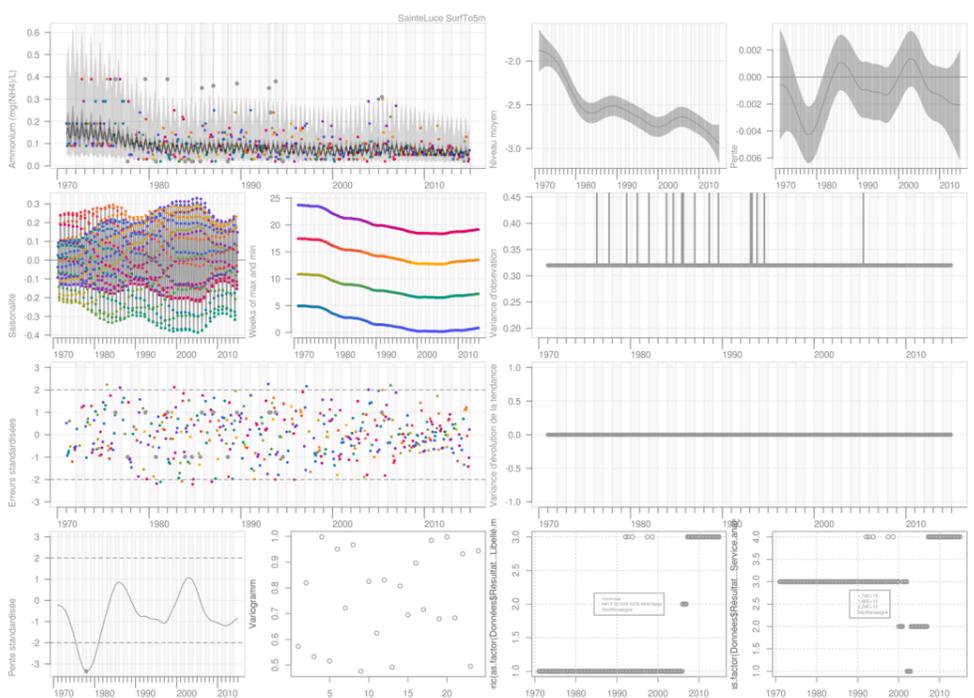
La Possonnière



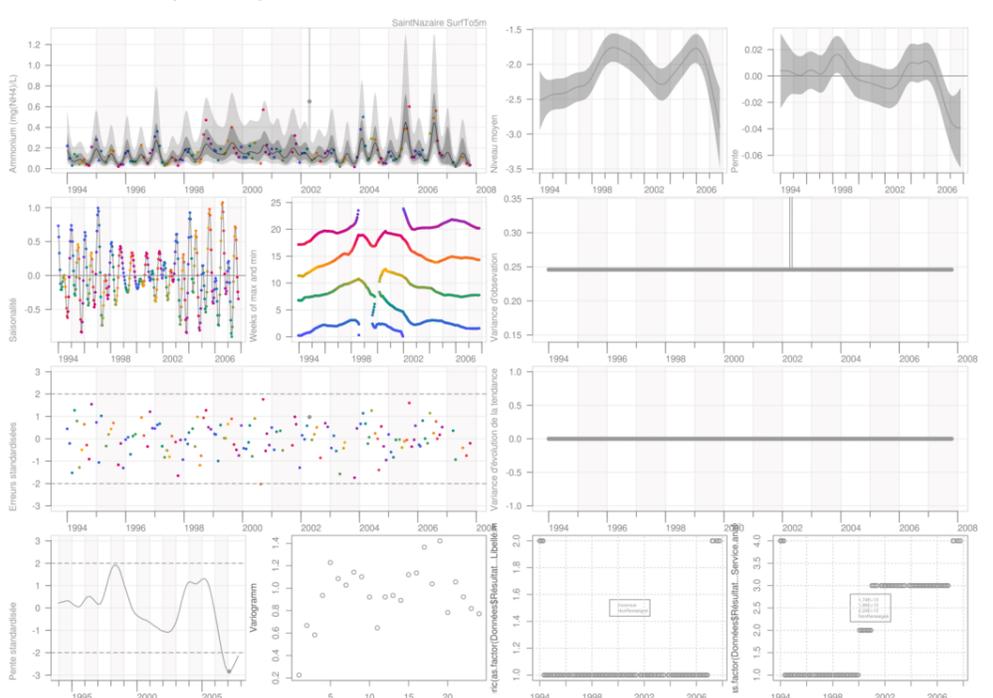
Cordemais



Sainte-Luce-sur-Loire



Saint-Nazaire (Mindin)



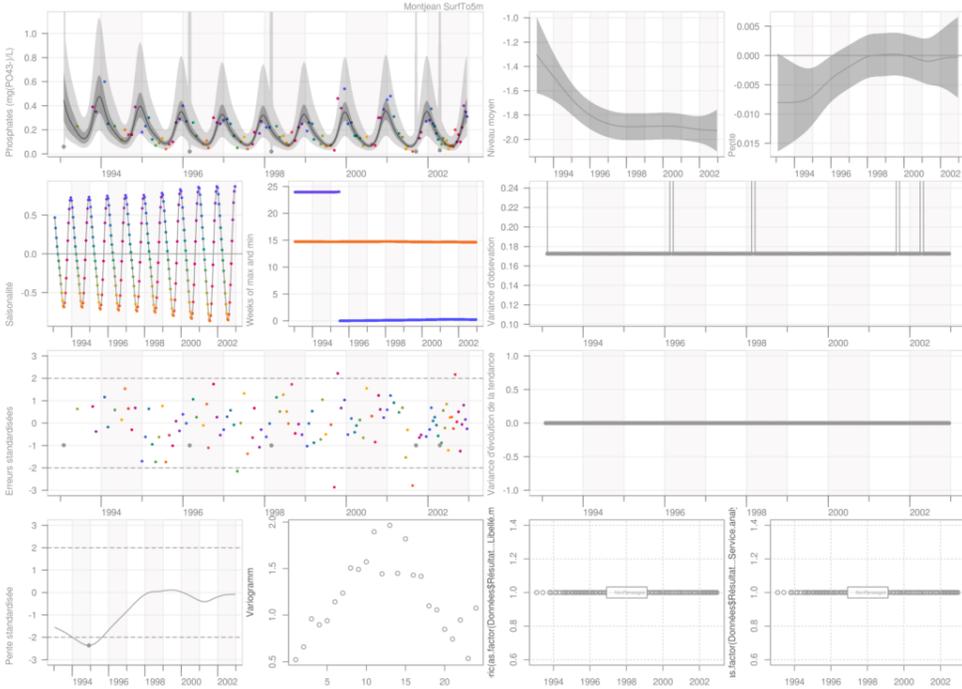
Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par Pétris & al., extrait de « An package for dynamic linear models ». Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas puis de gauche à droite)

Comprendre et exploiter les résultats :

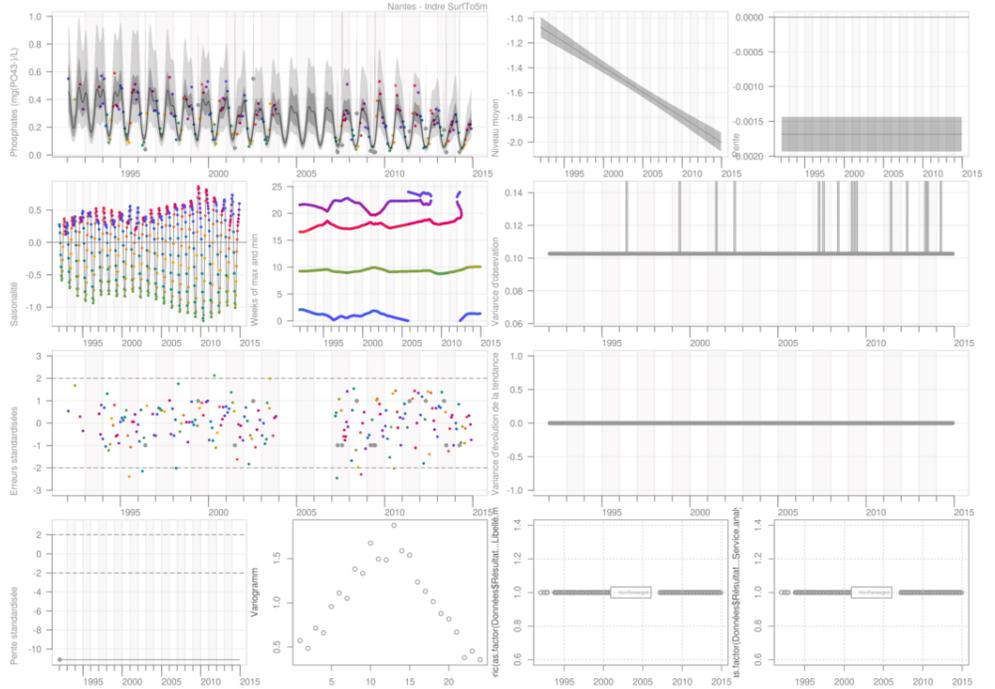
- 1 : Observation de l'enveloppe de confiance à 95% du signal dit sous-jacent dit « inobservable » ;
- 2 : Observation de la saisonnalité ;
- 3 : Observation des semaines où une valeur maximale ou minimale est atteinte ;
- 4 : Erreurs standardisées et leur enveloppe de confiance ;
- 5 et 6 : Pente et nuage de point des valeurs standardisées ;
- 7 : Niveau moyen des valeurs et enveloppe de confiance à 95% associée ;
- 8 : Pente du niveau moyen et enveloppe de confiance à 95% associée ;
- 9 : Variance d'observation ;
- 10, 11 et 12 : Ruptures de pente détectées par le modèle

1	7	8
2	3	9
4	10	
5	6	11
		12

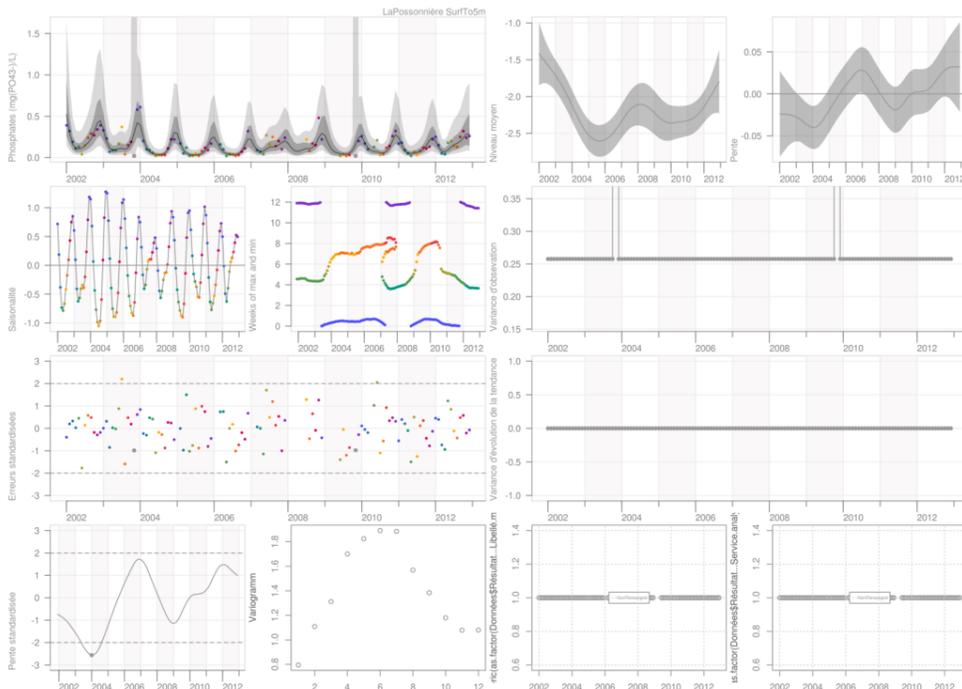
Montjean-sur-Loire



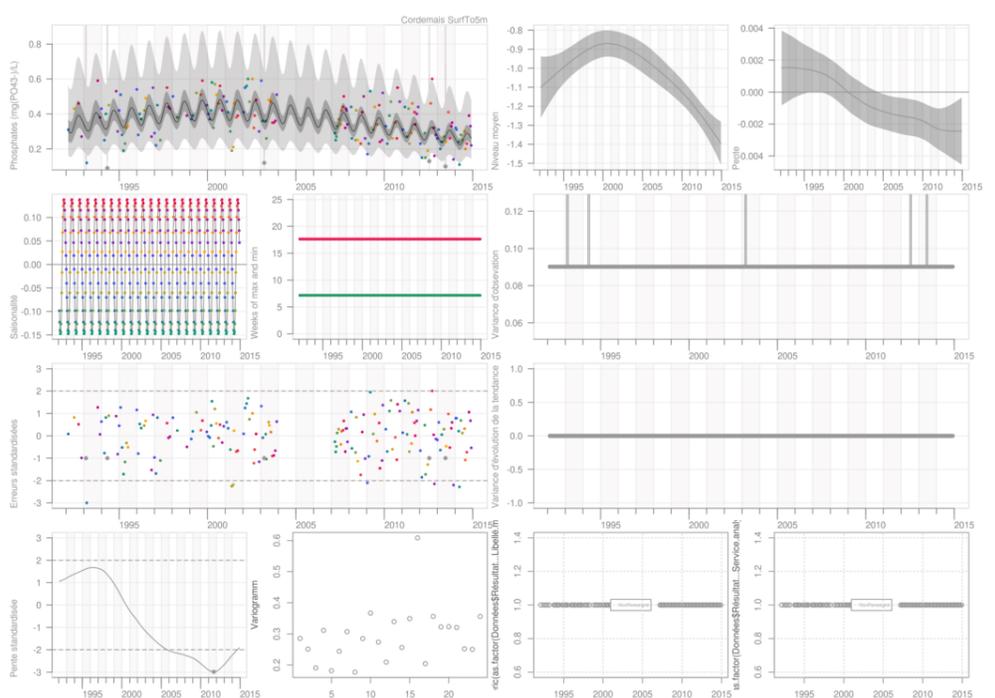
Nantes (Indre)



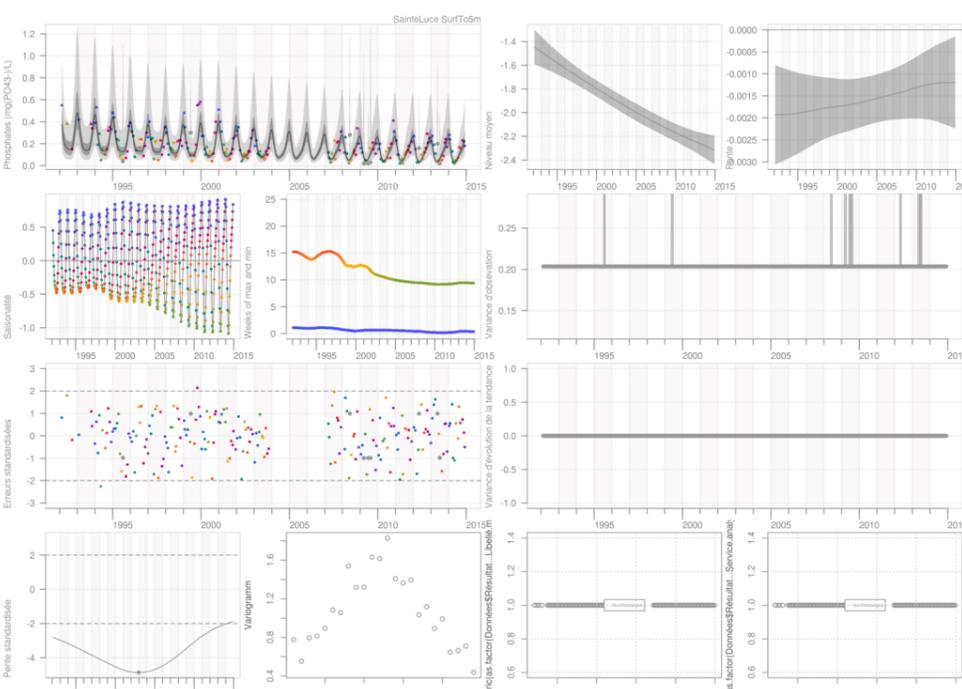
La Possonnière



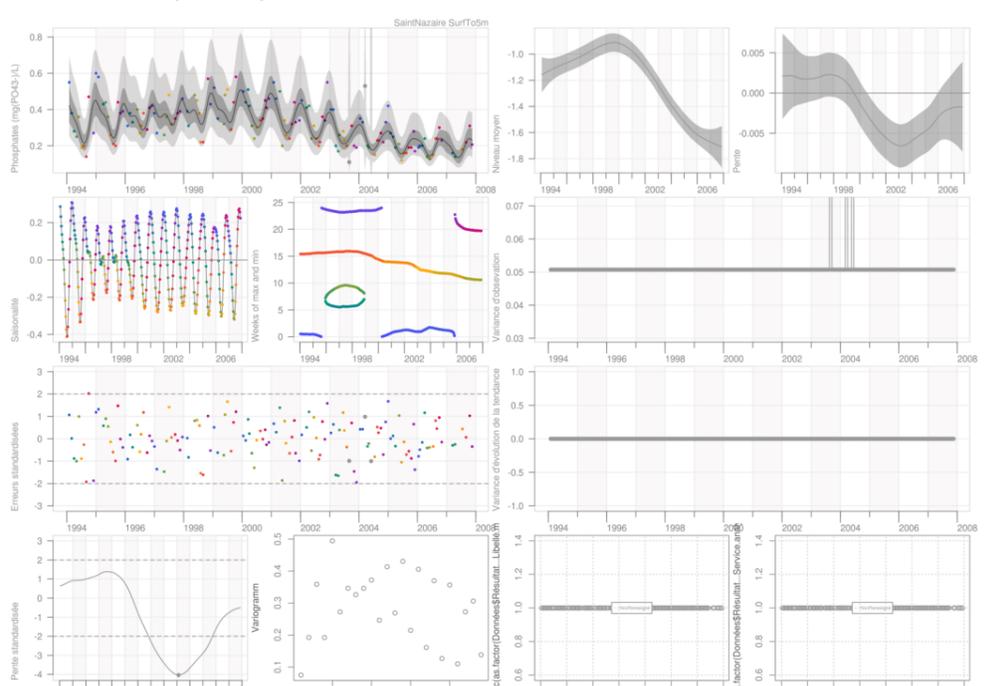
Cordemais



Sainte-Luce-sur-Loire



Saint-Nazaire (Mindin)



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par Pétris & al., extrait de « An package for dynamic linear models ». Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas puis de gauche à droite)

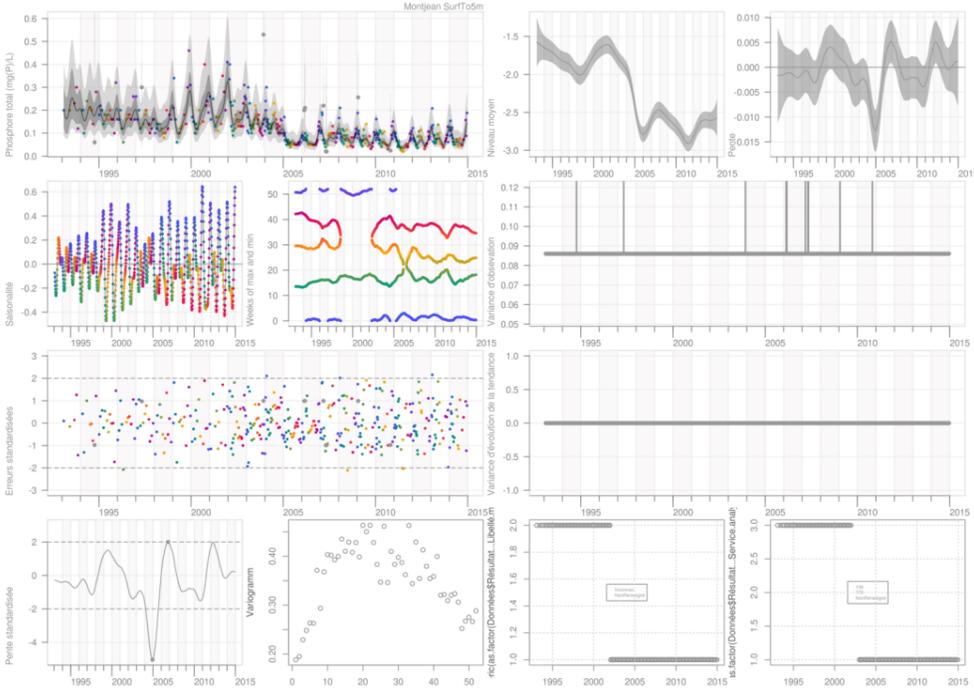
Comprendre et exploiter les résultats :

1 : Observation de l'enveloppe de confiance à 95% du signal dit sous-jacent dit « inobservable » ; 2 : Observation de la saisonnalité ; 3 : Observation des semaines où une valeur maximale ou minimale est atteinte ; 4 : Erreurs standardisées et leur enveloppe de confiance ; 5 et 6 : Pente et nuage de point des valeurs standardisées ; 7 : Niveau moyen des valeurs et enveloppe de confiance à 95% associée ; 8 : Pente du niveau moyen et enveloppe de confiance à 95% associée ; 9 : Variance d'observation ; 10, 11 et 12 : Ruptures de pente détectées par le modèle

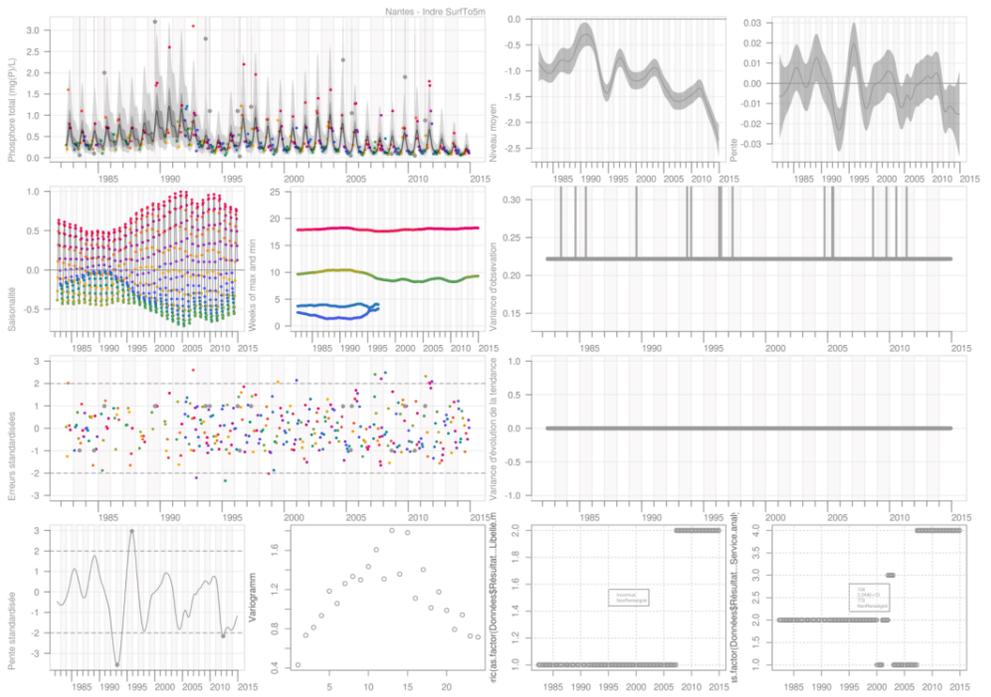
1	7	8
2	3	9
4	10	
5	6	11
		12

Synthèse des résultats du « Modèle Linéaire Dynamique » selon la méthodologie Pétris (2010) pour le phosphore total pour 6 stations d'étude du GIP Loire Estuaire

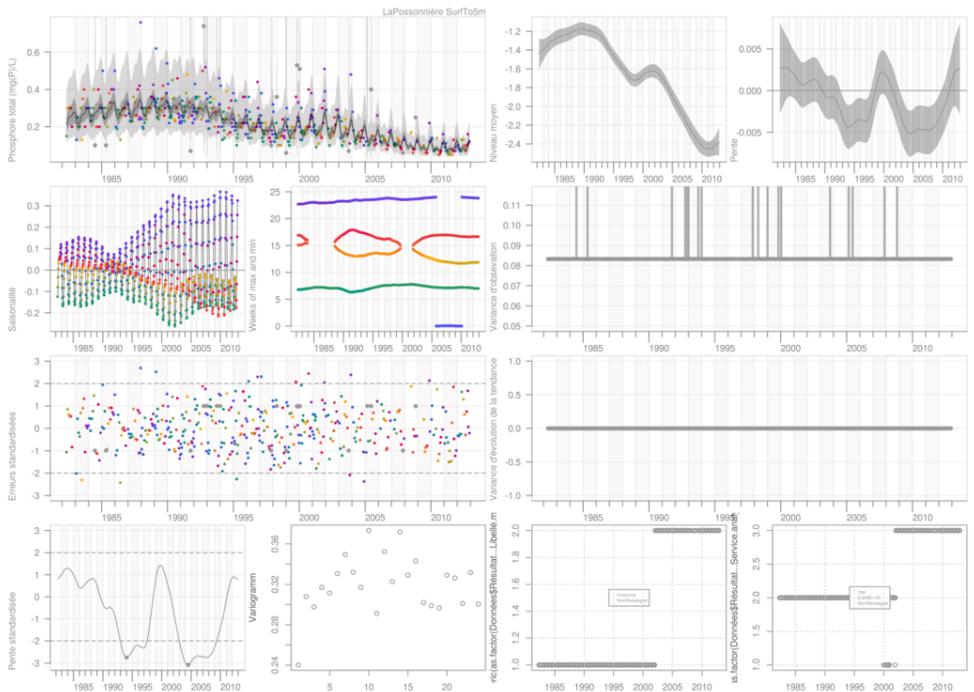
Montjean-sur-Loire



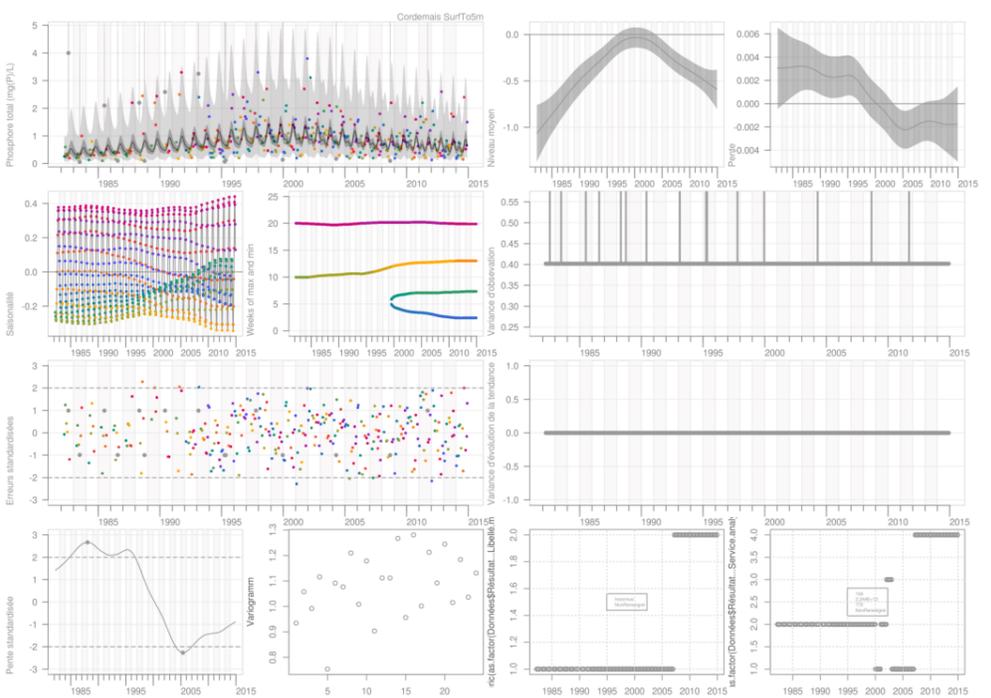
Nantes (Indre)



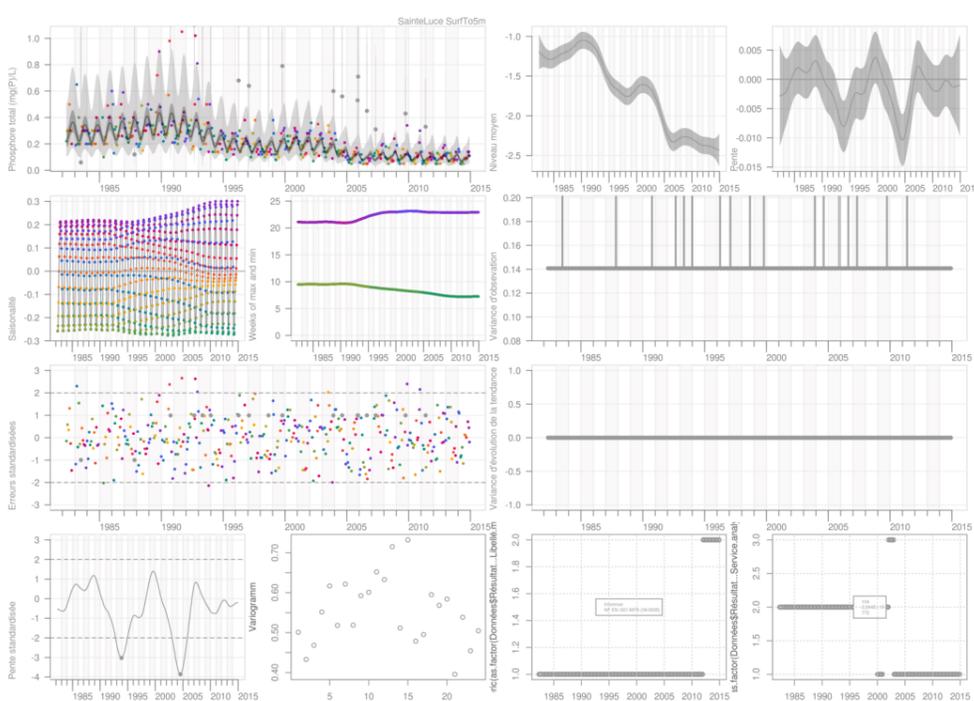
La Possonnière



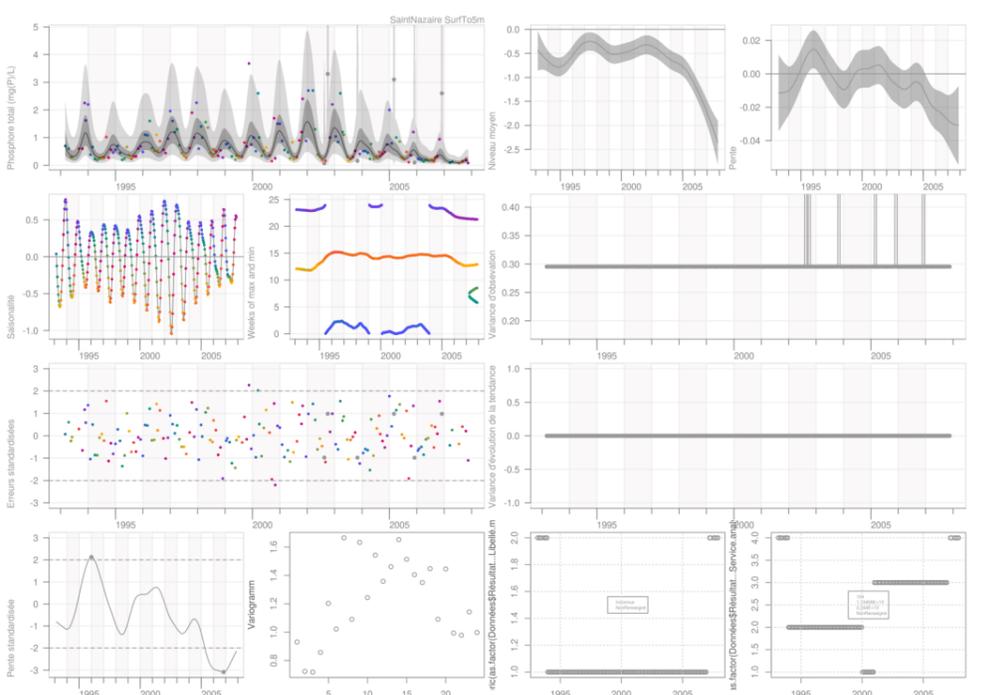
Cordemais



Sainte-Luce-sur-Loire



Saint-Nazaire (Mindin)



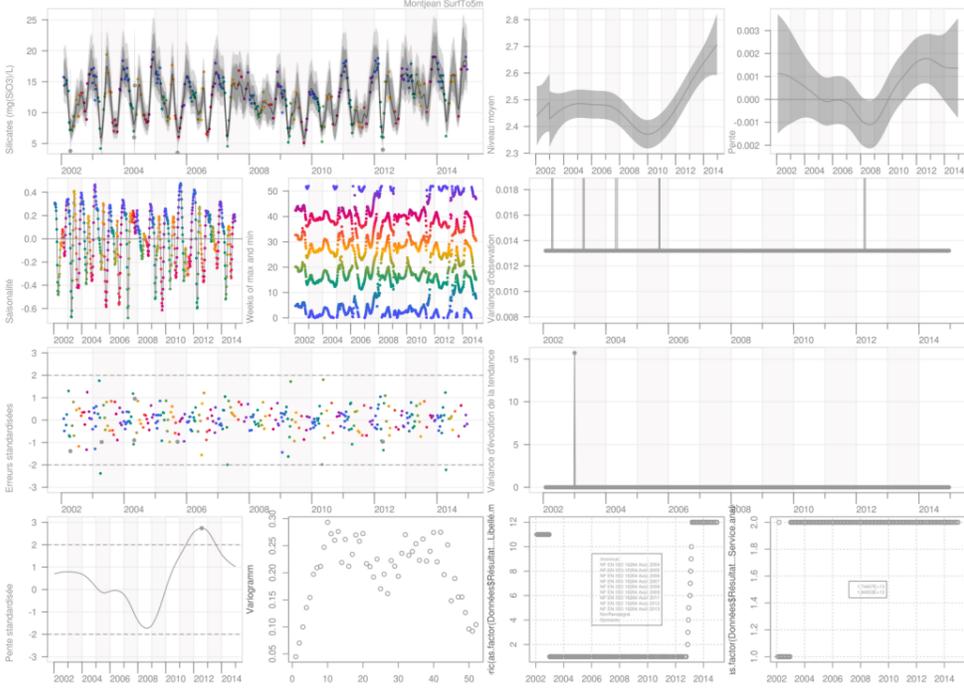
Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par Pétris & al., extrait de « An package for dynamic linear models ». Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas puis de gauche à droite)

Comprendre et exploiter les résultats :

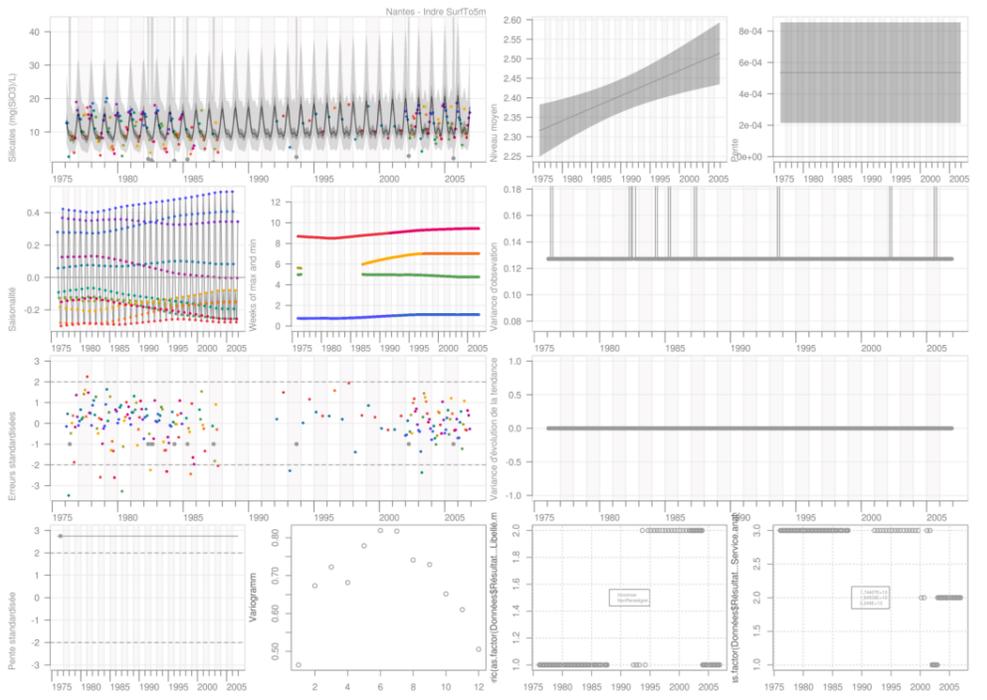
- 1 : Observation de l'enveloppe de confiance à 95% du signal dit sous-jacent dit « inobservable » ;
- 2 : Observation de la saisonnalité ;
- 3 : Observation des semaines où une valeur maximale ou minimale est atteinte ;
- 4 : Erreurs standardisées et leur enveloppe de confiance ;
- 5 et 6 : Pente et nuage de point des valeurs standardisées ;
- 7 : Niveau moyen des valeurs et enveloppe de confiance à 95% associée ;
- 8 : Pente du niveau moyen et enveloppe de confiance à 95% associée ;
- 9 : Variance d'observation ;
- 10, 11 et 12 : Ruptures de pente détectées par le modèle

1	7	8
2	3	9
4	10	
5	6	11
		12

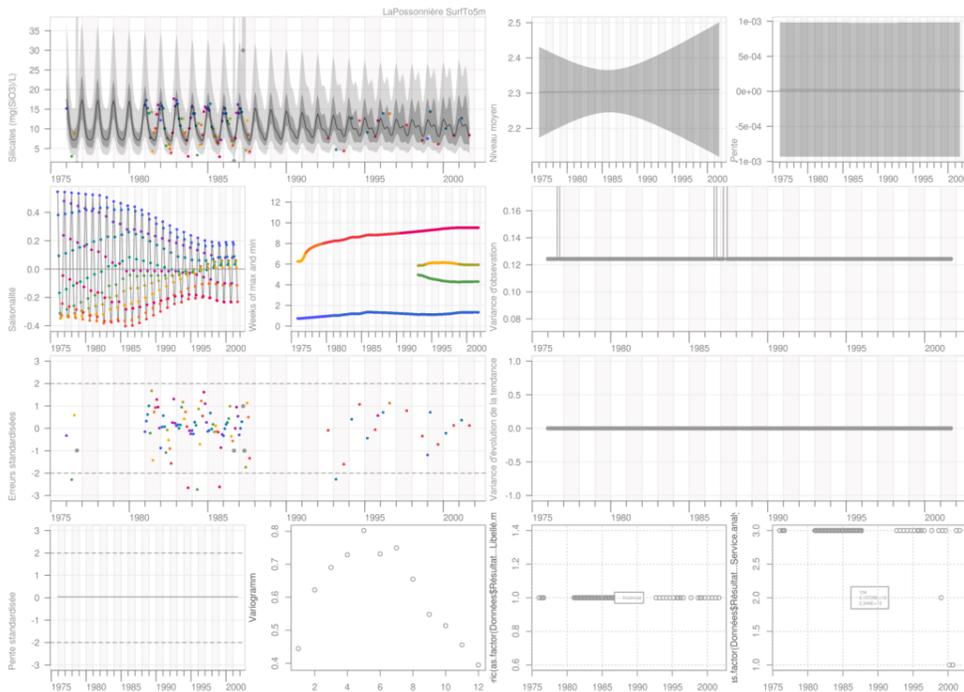
Montjean-sur-Loire



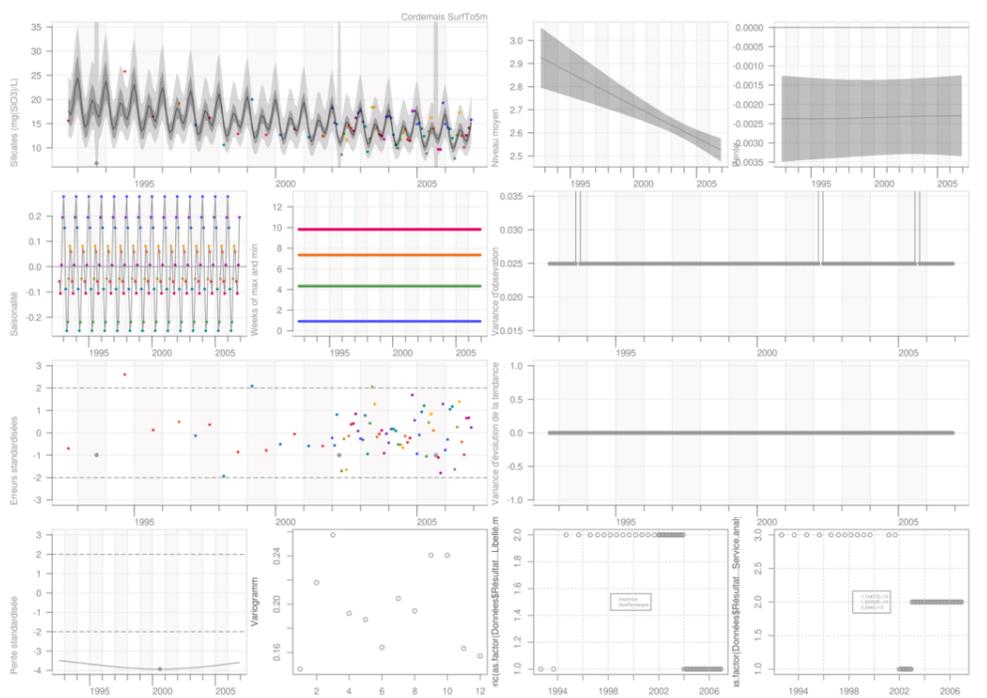
Nantes (Indre)



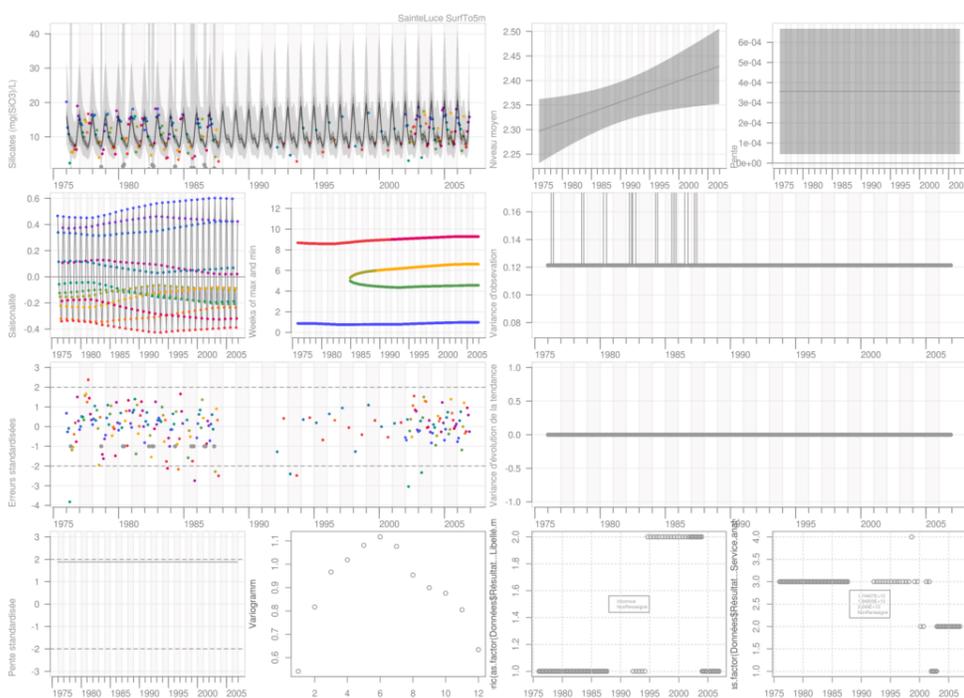
La Possonnière



Cordemais



Sainte-Luce-sur-Loire



Station de Saint-Nazaire (Mindin)

Absence de résultats

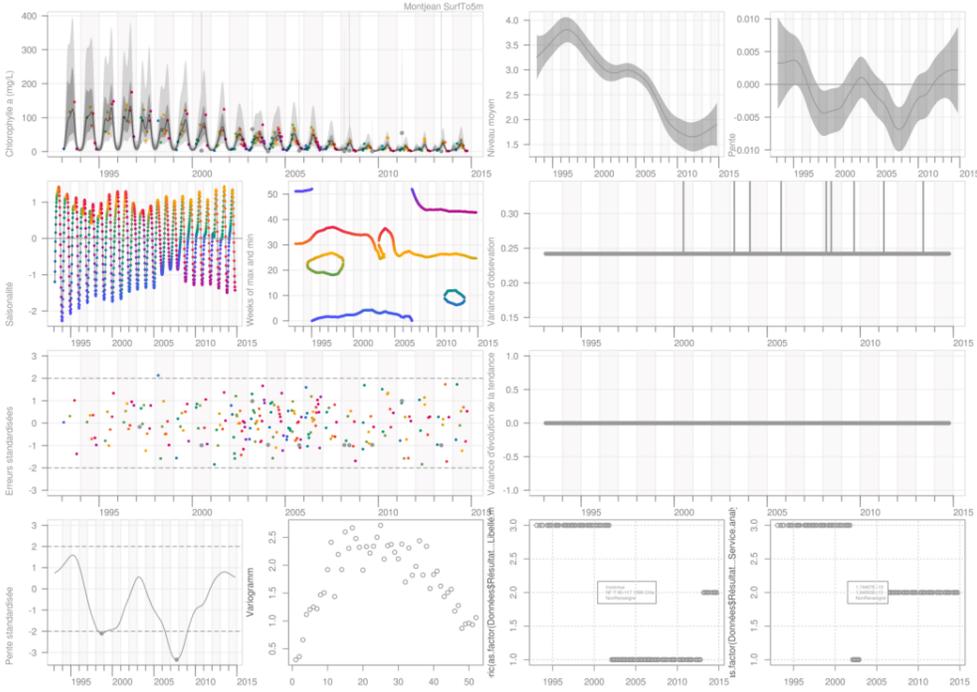
Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par Pétris & al., extrait de « An package for dynamic linear models ». Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas puis de gauche à droite)

Comprendre et exploiter les résultats :

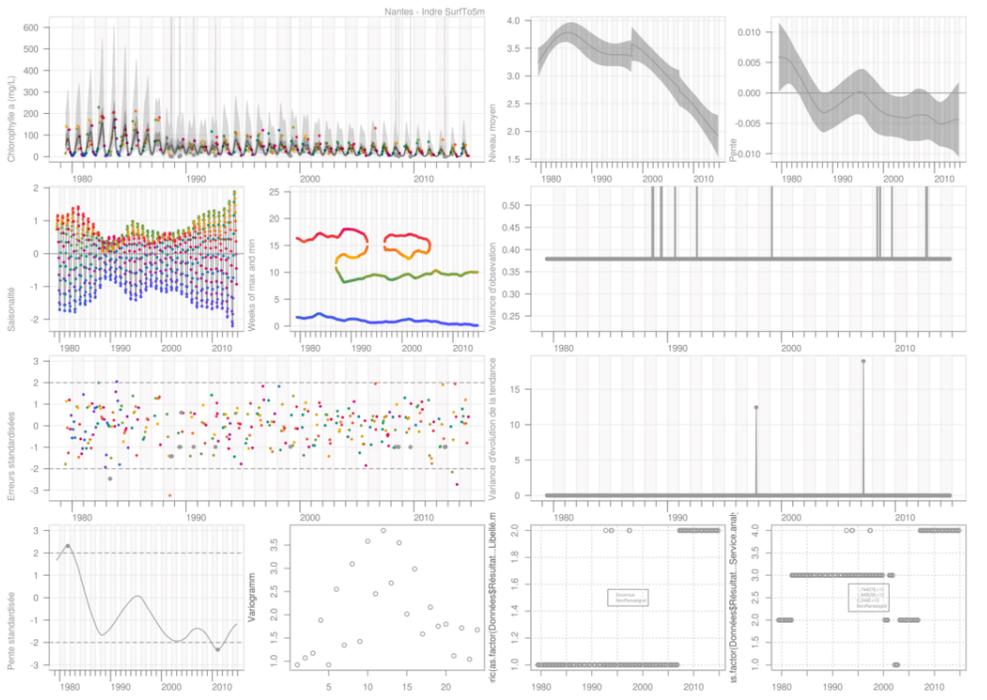
1 : Observation de l'enveloppe de confiance à 95% du signal dit sous-jacent dit « inobservable » ; 2 : Observation de la saisonnalité ; 3 : Observation des semaines où une valeur maximale ou minimale est atteinte ; 4 : Erreurs standardisées et leur enveloppe de confiance ; 5 et 6 : Pente et nuage de point des valeurs standardisées ; 7 : Niveau moyen des valeurs et enveloppe de confiance à 95% associée ; 8 : Pente du niveau moyen et enveloppe de confiance à 95% associée ; 9 : Variance d'observation ; 10, 11 et 12 : Ruptures de pente détectées par le modèle

1	7	8
2	3	9
4	10	
5	6	11
		12

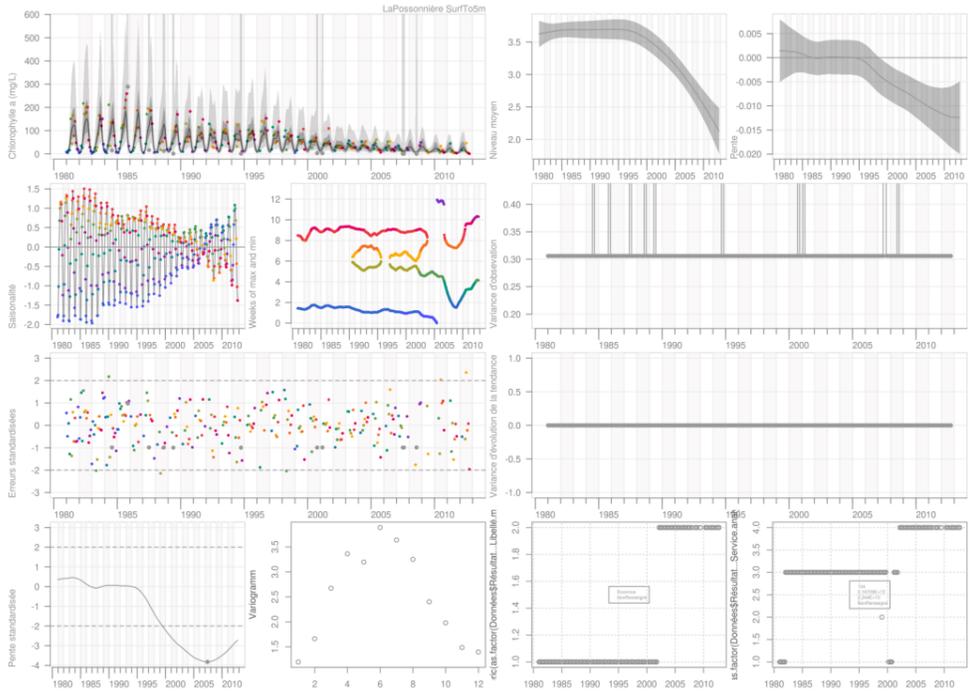
Montjean-sur-Loire



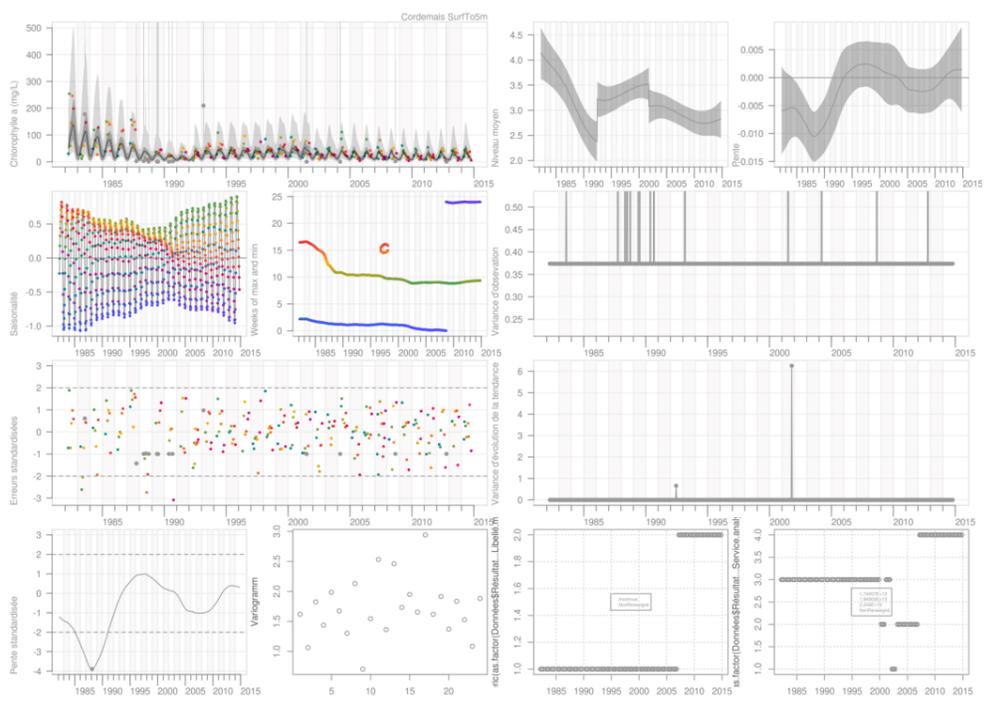
Nantes (Indre)



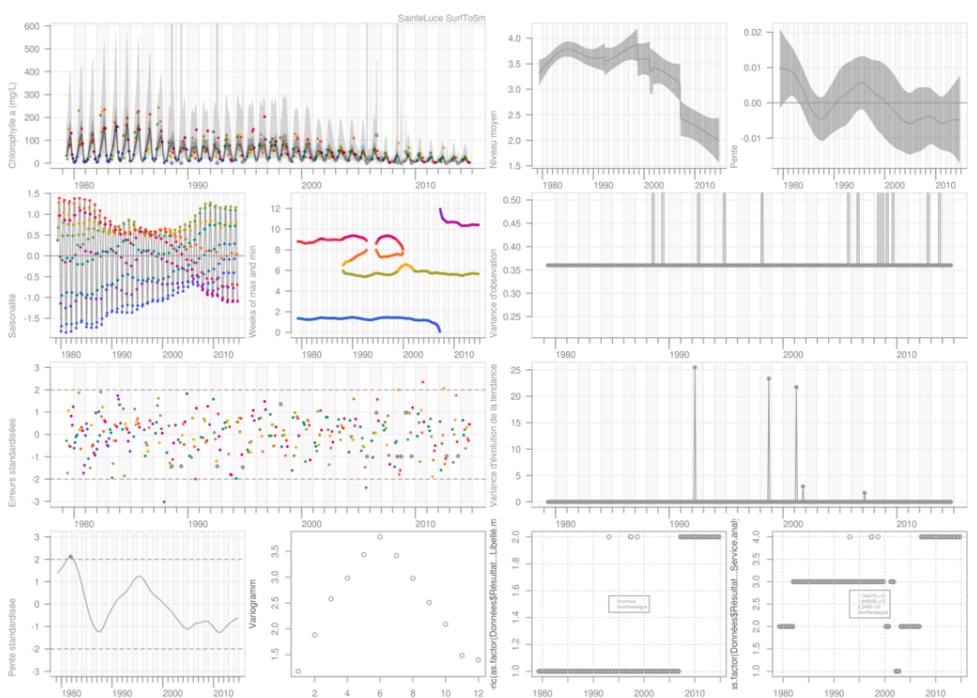
La Possonnière



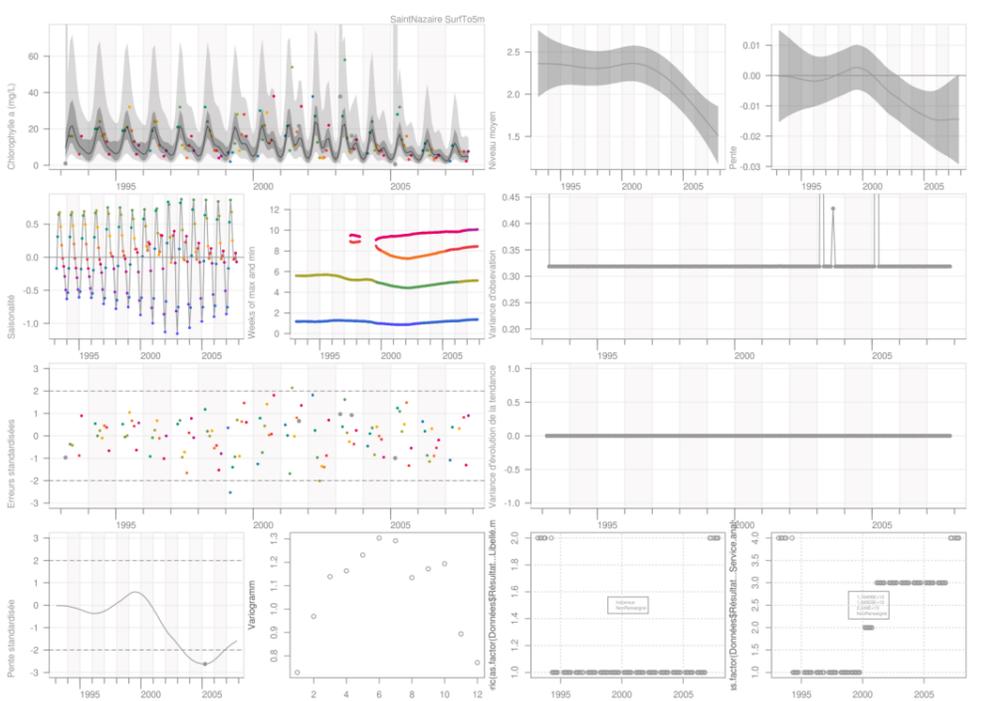
Cordemais



Sainte-Luce-sur-Loire



Saint-Nazaire (Mindin)



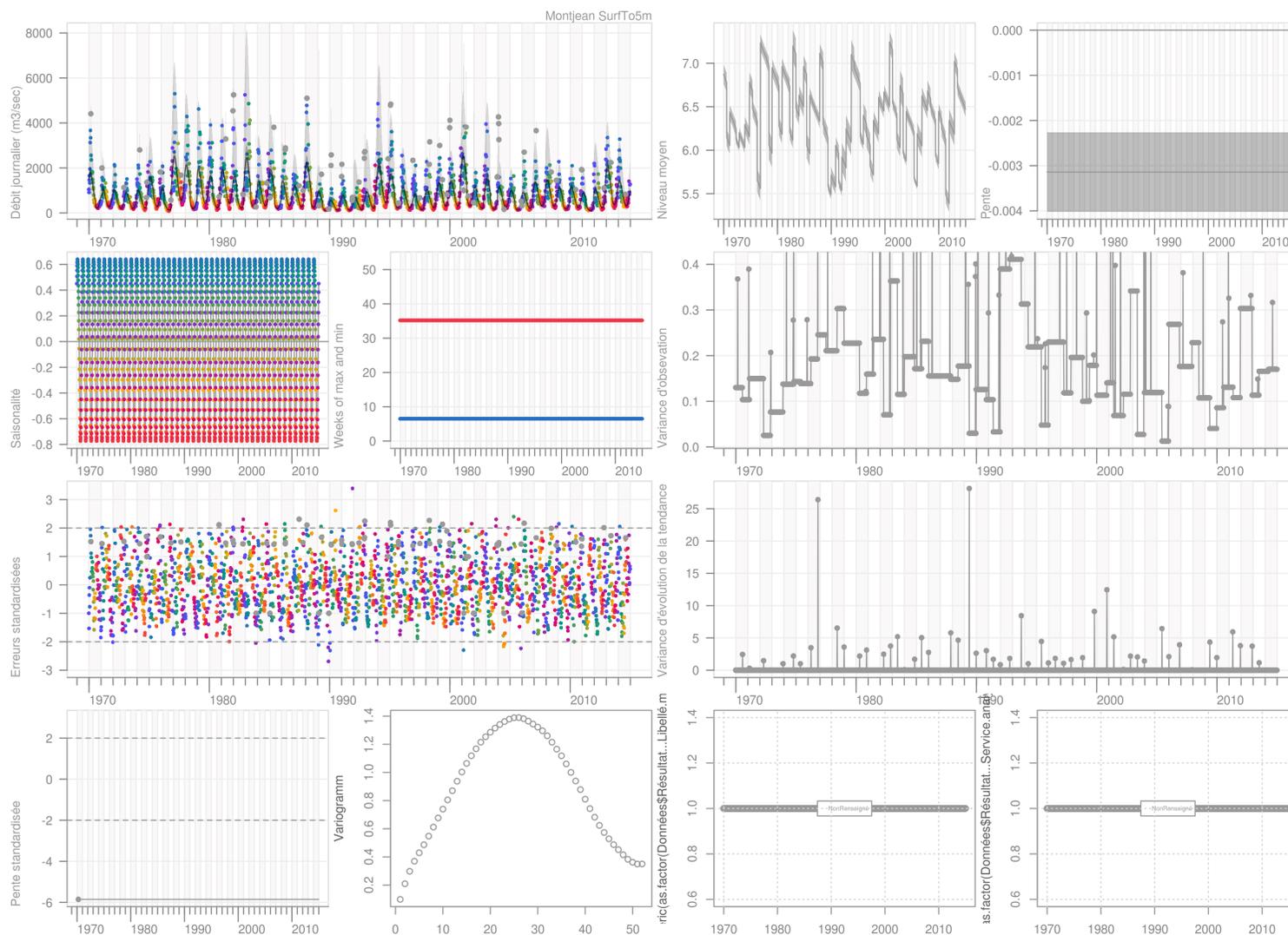
Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par Pétris & al., extrait de « An package for dynamic linear models ». Les résultats sont présentés par station de l'amont vers l'aval (du haut vers le bas puis de gauche à droite)

Comprendre et exploiter les résultats :

1 : Observation de l'enveloppe de confiance à 95% du signal dit sous-jacent dit « inobservable » ; 2 : Observation de la saisonnalité ; 3 : Observation des semaines où une valeur maximale ou minimale est atteinte ; 4 : Erreurs standardisées et leur enveloppe de confiance ; 5 et 6 : Pente et nuage de point des valeurs standardisées ; 7 : Niveau moyen des valeurs et enveloppe de confiance à 95% associée ; 8 : Pente du niveau moyen et enveloppe de confiance à 95% associée ; 9 : Variance d'observation ; 10, 11 et 12 : Ruptures de pente détectées par le modèle

1	7	8
2	3	9
4	10	
5	6	11
		12

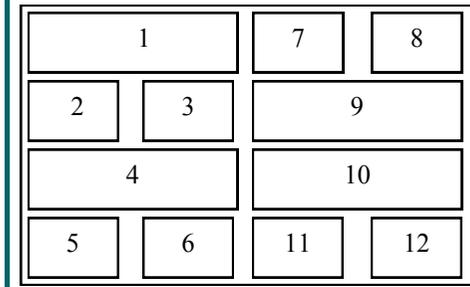
Synthèse des résultats du « Modèle Linéaire Dynamique » selon la méthodologie Pétris (2010) pour le débit à Montjean-sur-Loire



Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des séries temporelles par Pétris & al., extrait de « An package for dynamic linear models ».

Comprendre et exploiter les résultats :

1 : Observation de l'enveloppe de confiance à 95% du signal dit sous-jacent dit « inobservable » ; 2 : Observation de la saisonnalité ; 3 : Observation des semaines où une valeur maximale ou minimale est atteinte ; 4 : Erreurs standardisées et leur enveloppe de confiance ; 5 et 6 : Pente et nuage de point des valeurs standardisées ; 7 : Niveau moyen des valeurs et enveloppe de confiance à 95% associée ; 8 : Pente du niveau moyen et enveloppe de confiance à 95% associée ; 9 : Variance d'observation ; 10, 11 et 12 : Ruptures de pente détectées par le modèle



Annexe 11 : Synthèse des résultats obtenus pour la corrélation entre les teneurs en chlorophylle *a* et les paramètres associés à l'eutrophisation en fonction des gammes de qualités des SEQ-eau, SEQ-littoral et SEEE

