



Une analyse de la variabilité spatio-temporelle des flux et des sources du phosphore dans les cours d'eau bretons

Période 1987-2012



Pierre-Louis Legeay



Projet TRANS-P

Contact : Gérard Gruau, UMR CNRS 6118 Géosciences Rennes, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex
e-mail : gerard.gruau@univ-rennes1.fr ; tel : 02 23 23 60 86

RESUME

Cette étude, menée dans le cadre du volet 2 du projet TRANS-P co-financé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'INRA et le CNRS est la première étude jamais réalisée à l'échelle de la Bretagne sur l'évolution dans le temps de la contamination des eaux de rivière par le Phosphore (P). Sa première phase a consisté à rassembler au sein d'une base commune (BD COUPLE) l'ensemble des données P accumulées en Bretagne depuis 1987, date des premières mesures, et à coupler ces données à des données de débit, permettant ainsi le calcul et l'analyse des flux. Trois bases de données sources ont été utilisées : OSUR, SISE-EAUX et ECOFLUX. Au final, 195 couples station P – station débit ont été générés, couvrant 60% environ du total de la surface de la Bretagne. Les données collectées portent sur des concentrations de P total (P_{tot}) obtenues sur eaux brutes et de P dissous (P_{dis}) obtenues sur eaux filtrées.

Le caractère basse fréquence de la plupart des séries de données collectées (1 analyse par mois en moyenne par station) a nécessité le développement et l'utilisation de méthodologies spécifiques pour pouvoir extraire des informations fiables sur l'évolution spatio-temporelles des flux ainsi que sur l'évolution, au sein de ces flux, des parts liées aux émissions diffuses agricoles et ponctuelles domestiques/industrielles. Ainsi, le traitement des données par ensembles de 5 années hydrologiques successives a permis de réduire les incertitudes sur les flux à $\pm 25\%$, ce qui est très inférieur à la variabilité des flux entre stations ; de même, le caractère plus haute-fréquence des données du réseau ECOFLUX (1 analyse par semaine) a permis d'utiliser ce réseau comme élément de validation des tendances et variations observées au niveau des stations basse-fréquence des autres réseaux. Une méthode basée sur la variation temporelle des débits a par ailleurs été utilisée pour extraire les données correspondant aux périodes d'étiage, ces données permettant une estimation de la part représentée par les émissions ponctuelles domestiques/industrielles dans les flux totaux.

Trois principaux résultats sont mis en évidence : i) une baisse généralisée des flux de P_{tot} et P_{dis} depuis 1987 en Bretagne, le flux global de P_{tot} émis vers les côtes étant ainsi passé en valeur moyenne annuelle de 2700 ($\pm 21\%$) tonnes à la fin des années 1990 à 1100 (+20%/-15%) tonnes par an en 2012 ; cette baisse implique aussi bien les émissions diffuses agricoles que les émissions ponctuelles domestiques/industrielles ; ii) une baisse également généralisée de la part des émissions ponctuelles domestiques/industrielles dans les flux globaux annuels ; ainsi après avoir représenté jusqu'à 70% du flux de P_{dis} dans certains bassins à la fin des années 1990, ces émissions ne représentent plus en moyenne aujourd'hui que 30 à 20% au plus du flux total annuel de P_{dis} et de P_{tot} ; iii) une très grande variabilité spatiale des flux à l'échelle des sous-bassins amont, avec une taille d'aire drainée caractéristique de 500 km², taille au-dessous de laquelle les bassins versants bretons se différencient entre des bassins faiblement et fortement émetteurs de P.

La conséquence première de ces résultats est de montrer que les marges de progrès actuelles en matière de réduction des émissions de P en provenance des bassins versants bretons sont principalement à rechercher du côté des émissions diffuses agricoles, lesquelles représentent aujourd'hui entre 70 et 80% des flux de P rejetés à la mer. La baisse enregistrée depuis 25 ans des flux de P agricole indiquent que des leviers ont commencé à être enclenchés sur ce plan en Bretagne. On peut en effet penser que cette baisse indique que les mesures agro-environnementales visant à limiter l'érosion des sols et les apports de particules au cours d'eau comme l'obligation de ne pas laisser les sols nus en hiver ou l'implantation systématique de bandes enherbées qui ont été prises en Bretagne ces dernières années ont commencé à porter leur fruit, et que des marges de progrès existent, surtout si en parallèle de ces mesures une gestion raisonnée des amendements en P était instituée.

En mettant en évidence des tendances claires et généralisées à l'échelle de la Bretagne, cette étude démontre que les séries de données basse-fréquences, quoique très imparfaites de prime abord, peuvent être au final très riches d'enseignement quant à l'évolution et aux causes de la pollution des eaux par le P.

AVANT-PROPOS

Cette étude, réalisée par Pierre-Louis LEGEAY, ingénieur d'étude en géochimie et hydrologie a été conduite dans le cadre du volet 2 du projet TRANS-P, avec le laboratoire *Géosciences Rennes*, UMR 6118 CNRS – Université de Rennes 1 comme laboratoire d'accueil. L'encadrement principal a été effectué par Gérard GRUAU, Directeur de recherche au CNRS, Géosciences Rennes, assisté de Florentina MOATAR, Professeur des Universités, Université François Rabelais de Tours.

Le projet TRANS-P, co-financé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'INRA, le CNRS et l'Université de Tours, est un projet d'ampleur régionale dont l'objectif est l'étude des TRANSferts du Phosphore (P) des terres agricoles au cours d'eau, en utilisant des approches mariant analyses (analyses des stocks dans les sols et des flux véhiculés par les cours d'eau), étude de mécanismes (mécanismes de mobilisation et de transfert du phosphore à l'échelle du bassin versant élémentaire) et modélisation.

Ce projet s'inscrit dans un double contexte règlementaire. D'une part, le contexte européen de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) qui vise à l'atteinte ou à la conservation du bon état écologique, chimique et quantitatif des masses d'eau superficielles et profondes et qui inscrit le P comme paramètre réglementaire, en tant que nutriment participant à processus d'eutrophisation. D'autre part, le contexte régional propre au SDAGE Loire Bretagne, qui par sa disposition 3B1 prévoit une diminution des apports de P et une rééquilibrage de la fertilisation en P à l'amont de 14 retenues d'eau sensibles à l'eutrophisation, dont 10 sont situées en Bretagne.

D'un point de vue global, l'étude présentée est la première étude visant à une analyse exhaustive des flux de P à l'échelle de la Bretagne, de leur variabilité spatio-temporelle et de la part des sources ponctuelles domestiques/industrielles et diffuses agricoles au sein de ces flux. Comme ailleurs en France et en Europe, les apports ponctuels domestiques et industriels de P aux masses d'eau superficielles sont censés avoir fortement diminués dans la période récente du fait de l'amélioration des systèmes d'épuration et de l'interdiction des phosphates dans les détergents ménagers et industriels. L'ampleur et la vitesse de ces diminutions sur les flux restent cependant mal connues à l'échelle de la région Bretagne, comme est mal connue la part des flux domestiques/industriels et agricoles au sein des flux globaux. Ainsi, à l'inverse des nitrates pour lesquels il existe des données quantitatives sur les flux exportés par la plupart des cours d'eau de Bretagne, il n'existe aujourd'hui aucune étude exhaustive des flux de P à cette même échelle, ni de comment ces flux ont varié dans le temps et dans l'espace.

Un des freins communément avancés à cette absence de connaissance est la faible fréquence des mesures des concentrations en P généralement disponibles sur les cours d'eau. L'un des objectifs de l'étude présentée ici est de montrer que malgré cette faible fréquence, des informations pertinentes peuvent être déduites sur les flux de P et leur variation spatio-temporelle, moyennant un travail de collecte et mutualisation de l'ensemble des données existantes, couplé à une réflexion sur la manière d'estimer et de minorer les incertitudes sur les flux calculés.

L'autre objectif est d'analyser les résultats obtenus en matière de tendance temporelle et de variabilité spatiale et temporelle. Comment ont évolué dans la période récente les flux de P en Bretagne ? Fait-on apparaître des disparités géographiques avec des flux plus élevés à l'Ouest qu'à

l'est comme certains auteurs en ont émis l'hypothèse ? Comment ont évolué dans le temps les parts domestiques/industrielles et agricoles du flux (observe-ton la diminution prévue de la part du flux domestique/agricole?).

Au final, l'objectif du travail présenté est de fournir le corpus de connaissances de base nécessaire pour 1) améliorer le diagnostic du point de vue de la pollution des masses d'eaux de Bretagne par le P, et 2) aider à la définition et à la mise en place de plans d'action à l'échelle du bassin-versant visant à réduire cette pollution.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Marie Czamanski, animatrice du Réseau ECOFLUX au sein de l'Institut Universitaire Européen de la Mer, et Thierry Panaget, Ingénieur du Génie Sanitaire à l'Agence Régionale de Santé Bretagne, pour les précieuses données supplémentaires qu'ils ont bien voulu mettre à ma disposition.



www-iuem.univ-brest.fr/ecoflux



www.ars.bretagne.sante.fr

Je remercie également toutes les autres personnes qu'il m'a été donné de rencontrer au cours de cette étude et qui, par l'échange et la discussion, ont contribué à son aboutissement.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	9
1.1. Objectifs généraux de l'étude et démarche suivie.....	9
1.2. Rappels sur les formes, sources et voies de transfert du phosphore	10
1.3. Rappels sur les difficultés engendrées par la forte variabilité temporelle des concentrations sur le calcul des flux et l'estimation des erreurs associées... ..	14
1.4. Objectifs techniques de l'étude et questions précises abordées.....	16
2. MATERIELS & METHODES	17
2.1. Construction d'une base de données couplant données phosphore et données de débits : la BD COuPIE.....	17
2.1.1. Sources et caractéristiques des données de phosphore.....	17
2.1.2. Source des données de débit	20
2.1.3. Caractéristiques et principes de construction de la base de données COuPIE	21
2.2. Méthodes utilisées pour le calcul des lux, l'estimation des incertitudes et de la part des sources diffuses agricoles et ponctuelles urbaines/industriels.....	26
2.2.1. Liens entre dynamique hydrique, flux et sources du phosphore : quelques rappels ...	26
2.2.2. Calcul des flux et estimation des incertitudes.....	30
2.2.3. Estimation des parts diffuses agricoles et ponctuelles urbaines/industrielles du flux .	34
2.3. Outils statistiques utilisées pour l'analyse des tendances temporelles.....	41
3. RESULTATS	43
3.1. Effet du choix de la méthode de calcul sur la valeur du flux annuel et sur l'estimation de l'incertitude associée.....	43
3.2. Bilan des incertitudes sur les flux annuels et les flux d'étiage	46
3.2.1. Incertitude sur les flux annuels	46
3.2.2. Incertitude sur les flux d'étiage.....	48
3.3. Couverture spatio-temporelle de la BD COuPIE.....	51
3.4. Evolution des concentrations, de l'hydraulicité et des flux sur la période 1987-2011	52
3.4.1. Evolution des concentrations.....	52
3.4.2. Evolution de l'hydraulicité.....	54
3.4.3. Evolution et distribution spatiale des flux globaux	54
3.4.4. Estimation des flux globaux de phosphore arrivant aux côtes et de leur évolution dans le temps.....	65
3.4.5. Evolution et distribution spatiale des flux d'étiage, assimilés aux rejets ponctuelles de phosphore d'origine domestique et industrielle.....	65

3.5. Calcul et évolution des parts diffuses agricoles et ponctuelles domestiques/industrielles dans les flux globaux annuels	72
4. DISCUSSION	75
4.1. Validation des séries basse-fréquences comme outils fiables d'estimation des flux et des tendances long-termes.....	76
4.2. A propos du flux d'étiage pris comme moyen d'estimer la part des sources domestiques/industrielles dans le flux total annuel	77
4.3. Signification et causes possibles des tendances long-termes et des variabilité spatials observées.....	80
4.3.1. Tendances temporelles	80
4.3.2. Variabilité spatiale.....	81
5. PERSPECTIVES	84
5.1. Accroître le nombre de bassins versants renseignés et améliorer la précision sur les flux..	84
5.2. Extraire de nouveaux indicateurs utiles au diagnostic.....	85
5.3. Pouvoir mieux confronter les tendances et variabilités à leurs facteurs potentiels de causalité.....	86
5.4. Des outils de diagnostic pour les acteurs de terrain	87
6. CONCLUSION.....	90
7. ANNEXES	92
8. BIBLIOGRAPHIE.....	102

ABREVIATIONS

AELB : Agence de l'Eau Loire Bretagne.

ARS : Agence Régionale de Santé.

BF : Basse Fréquence.

Carthage : CARTographie THématique des AGences de l'Eau.

COUPLE : Nom donné à la base de donnée générée dans cette étude pour le calcul des flux, et rassemblant l'ensemble des couple formé par l'association d'une station de mesure des concentrations en phosphore et d'une station de mesure du débit de l'eau.

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

DCE : Directive Cadre sur l'Eau.

HF : Haute Fréquence.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

MF : Moyenne Fréquence.

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

OSUR : EAU SURveillance : base de données eaux superficielles de l'AELB.

P : Phosphore.

P_{dis} : Phosphore dissous.

P_{part} : Phosphore particulaire.

P_{tot} : Phosphore total.

PO₄ : Orthophosphates.

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau.

SAU : Surface Agricole Utile.

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau.

SIG : Système d'Information Géographique.

SISE-EAUX : Système d'Information des services Santé-Environnement Eaux.

STEP : Station d'épuration des eaux usées.

TRANS-P : Etude AELB, CNRS, INRA, Université de Tours sur les transferts de phosphore dans les bassins versants agricoles de Bretagne

1. INTRODUCTION

1.1. OBJECTIFS GENERAUX DE L'ETUDE ET DEMARCHE SUIVIE

L'apport de nutriments (principalement azote (N) et phosphore (P)) en excès aux eaux continentales et côtières conduit à leur eutrophisation, processus se manifestant par des développements massifs d'algues avec des conséquences écologiques et économiques néfastes pour les masses d'eau affectées. En Bretagne, région placée au premier rang des régions impactées par ce processus tant à l'échelle française qu'européenne, cela se traduit pour les eaux marines par des efflorescences d'algues vertes récurrentes au niveau de certaines baies et estuaires (marées vertes) et, pour les eaux douces, par une recrudescence des blooms à cyanobactéries toxiques dans un nombre croissant de retenues et de cours d'eau.

La DCE fixe des objectifs aux gestionnaires pour la reconquête du "bon état écologique" des masses d'eau, et impose le respect de normes de qualité environnementales visant à l'atteinte de ce bon état écologique d'ici à 2015. Cette atteinte impose de réduire les émissions de N et de P, principales causes du processus d'eutrophisation, le P étant le facteur principal de maîtrise du phénomène dans le cas des eaux douces (Correl et al., 1998 ; Schindler et al., 2008). C'est dans ce contexte que les dispositions 3A et 3B du SDAGE 2010-2015 Loire Bretagne prévoient une diminution des apports directs et diffus de P au cours d'eau, et que sa disposition 3B1 cible 14 bassins versants en amont de retenues d'eau particulièrement touchées par l'eutrophisation, bassin versant au sein desquels la fertilisation en P doit être rééquilibrée. Parmi ces 14 bassins prioritaires, 10 sont situés en Bretagne (AELB, 2009).

Ces dernières décennies, des efforts et des moyens importants ont été consacrés à comprendre les sources et mécanismes impliqués dans la contamination des eaux par le N. La communauté scientifique et les gestionnaires se sont peu à peu dotés d'outils de diagnostic et de gestion des flux de N, et les connaissances concernant ce nutriment se sont fortement accrues. Pour le P, les outils de diagnostic sont largement en retrait et la connaissance des processus et des sources reste limitée, alors même que le contexte breton est un contexte à risque fort du point de vue de ce nutriment du fait i) des fortes teneurs en P des sols agricoles, ii) de l'existence de surplus importants liés à la pratique de l'élevage intensif, et iii) de la sensibilité avérée des milieux aquatiques bretons à l'eutrophisation. Aucune étude systématique n'a été réalisée à ce jour à l'échelle de la Bretagne permettant de quantifier les flux émis par les bassins versants et leur variabilité spatiale et temporelle. Seuls quelques travaux fragmentaires ciblés sur des bassins versants en particulier ont été à ce jour réalisés, ceux-ci étant par ailleurs relativement anciens (Quémeneur, 1987 ; Arousseau

2001). Cette situation fait que l'état actuel et passé de la contamination des eaux bretonnes par le P est mal connu. De même, la compréhension des mécanismes de transfert et la quantification des contributions urbaines/industrielles, d'une part, et agricoles, d'autre part, aux flux totaux sont beaucoup moins avancées que dans le cas du N.

L'objectif du volet 2 du projet TRANS-P est précisément de combler cette lacune en quantifiant les flux de P émis par les bassins versants bretons. Il s'agit aussi d'analyser comment ces flux varient spatialement aujourd'hui et comment ils ont évolué au cours des 25 dernières années. Un autre objectif du volet 2 du projet TRANS-P est d'utiliser les chroniques existantes de concentration en P dans les masses d'eau bretonnes pour accroître nos connaissances sur les sources et les mécanismes de transfert du P dans le contexte régional. Il s'agit enfin de tenter une quantification, cours d'eau par cours d'eau, de la part des apports diffus agricoles et des apports ponctuels urbains/industriels dans les flux totaux, et de comment ces parts ont évolué dans le temps et dans l'espace.

La démarche utilisée pour atteindre ces différents objectifs a été d'identifier, puis de collecter et de rassembler au sein d'une base de données unique l'ensemble des données existantes sur les teneurs en P des rivières de Bretagne, en remontant le plus loin possible dans le temps, et ce de manière à pouvoir fournir une image aussi exhaustive que possible de l'état actuel et de l'évolution dans le temps de la contamination. Préalablement à cette analyse, une réflexion a été menée sur la manière de minorer et d'estimer les incertitudes sur le calcul des flux. Parallèlement, une démarche spécifique permettant d'évaluer la part des sources ponctuelles urbaines/industrielles et diffuses agricoles a été développée.

Après un bref résumé des connaissances disponibles sur les sources et les voies de transfert du P vers les cours d'eau, ce rapport passe en revue et discute les principales avancées que le traitement des données collectées dans le cadre du projet TRANS-P permet d'effectuer concernant l'évaluation de la contamination des rivières de Bretagne par le P. Il se termine par une analyse des recherches restant à conduire, notamment pour un meilleur diagnostic et une meilleure compréhension des causes et des sources de cette contamination.

1.2. RAPPELS SUR LES FORMES, SOURCES ET VOIES DE TRANSFERT DU PHOSPHORE

FORMES DU PHOSPHORE DANS LES SOLS

Dans les sols, le P peut se trouver sous différentes formes, particulières ou dissoutes, organiques ou minérales (Fig. 1). Il est pertinent de distinguer les formes particulières des formes dissoutes, ces deux formes ayant des comportements et des voies de transfert différentes :

- i) **forme particulaire** : Il s'agit du P lié à la phase particulaire (P_{part}) organique ou minérale du sol. Il peut rentrer dans la structure des minéraux et des molécules organiques et être non échangeable avec la solution du sol. Il peut à l'inverse être adsorbé en surface, en position échangeable avec cette même solution, et être plus ou moins disponible et assimilable par les plantes. Les phases minérales les plus susceptibles d'adsorber du P sont les oxydes de fer et d'aluminium, ainsi que les argiles.
- ii) **forme dissoute** : Il s'agit du P en solution dans la phase aqueuse. Suivant son origine (effluents organiques, engrais minéraux, roche mère) et les processus biogéochimiques responsables de sa solubilisation, ce P peut être sous forme minérale (on parle alors d'orthophosphate) ou lié à des molécules organiques en solution. La méthode classique de dosage du P dissous (P_{dis}) étant la méthode au molybdate d'ammonium, et cette méthode ne révélant que la fraction orthophosphate, seule cette fraction est généralement dosée, la teneur en P_{dis} représentant donc au final principalement la teneur en orthophosphate. Le P_{dis} non réactif au molybdate est généralement considéré comme étant la part du P_{dis} se trouvant sous une forme organique (CORPEN, 1998 ; Lemerrier, 2003).

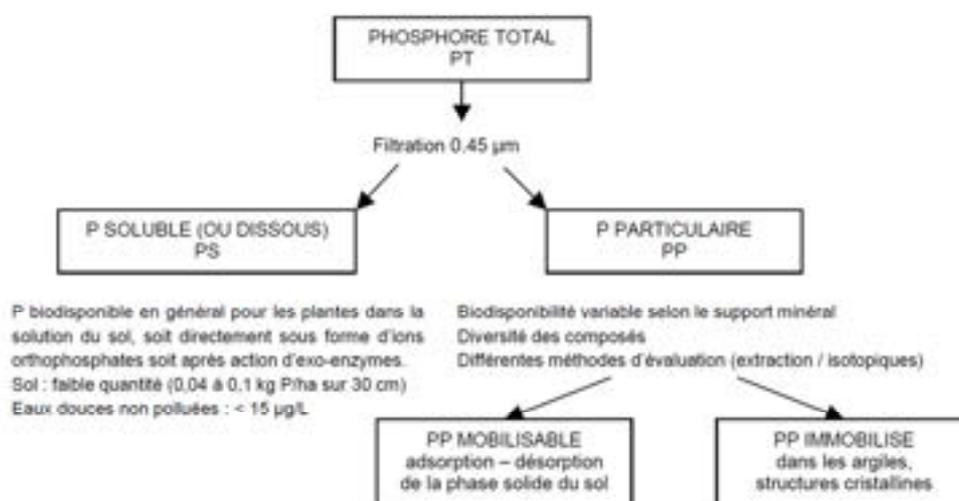


Figure 1 : Formes du phosphore dans les sols (d'après CORPEN, 1998).

Le P_{dis} minéral ou orthophosphate est immédiatement assimilable par les plantes, comme l'est la partie inorganique du P_{part} facilement échangeable avec la solution du sol. On parle pour l'ensemble de phosphore bio-disponible. Il existe plusieurs méthodes pour mesurer cette quantité de P bio-

disponible dans les sols, la plus utilisée en Bretagne étant la méthode Dyer (P extractible par une solution d'acide citrique à 2% et à pH 2).

FORMES DU PHOSPHORE DANS L'EAU

Comme dans les sols, le P peut se trouver dans les eaux soit sous forme dissoute, minérale ou organique, soit sous forme particulaire, également minérale ou organique (Dorioz, 1997) :

- i) **phosphore particulaire (P_{part})** : Cette catégorie regroupe toutes les formes dont la taille est supérieure à 0,45 μm . Il comprend le P inclus dans les minéraux (oxydes de fer ou d'aluminium, par exemple), les organismes vivants, les débris organiques, ainsi que le P adsorbé à la surface de ces différents composés. Des processus comme la désorption ou la minéralisation ont la capacité de transférer une partie de ce P vers le compartiment dissous.
- ii) **phosphore dissous (P_{dis})** : Il s'agit de la fraction du P qui n'est pas retenue par un filtre à 0,45 μm . Il inclut l'ion minéral libre, ou **orthophosphate (PO_4)**. Il inclut également les formes organiques solubles du P, ainsi que toutes les formes du P lié aux particules de taille inférieure à 0,45 μm , ce dernier pouvant être minéral ou organique. On parle dans ce cas de P colloïdal. Le P_{dis} peut devenir particulaire en s'adsorbant sur des particules, en étant piégé lors de la précipitation de minéraux (oxydes de fer, par exemple), ou encore en entrant dans la constitution d'organismes. Comme pour le P du sol, la méthode au molybdate d'ammonium ne révélant en général que le P présent sous la forme strictement dissoute et minérale (PO_4), cette méthode ne détecte pas les fractions organiques et/ou colloïdales du P_{dis} (sauf à procéder à une minéralisation acide de l'échantillon filtré avant dosage du P). Dans la plupart des cas, la teneur en P_{dis} obtenue reflète donc uniquement la teneur en ions libres PO_4 .

La somme du P_{dis} et du P_{part} constitue le **phosphore total** ou P_{tot} . Classiquement, le P_{part} n'est pas dosé directement. Sont dosés directement le P_{tot} (après minéralisation acide de l'échantillon brut, non filtré) et le P_{dis} (sur eau filtré à 0.45 μm), le P_{part} étant calculé par différence entre le P_{tot} et le P_{dis} .

Une fois intégré au cours d'eau, le P peut être transporté en solution ou sous forme particulaire ou bien stocké temporairement dans les sédiments du fond, soit sous forme particulaire soit adsorbé à la surface des particules constitutives de ces sédiments. On parle de **rétenion** du P par le sédiment. La rétenion du P dépend de la composition du sédiment, de sa granulométrie, des propriétés de surface des particules le composant, de la teneur en P du cours d'eau, de sa concentration totale en ions, du débit ainsi que des conditions de pH et du potentiel redox régnant à l'interface eau-sédiment.

SOURCES ET MECANISMES D'APPORT DU PHOSPHORE AUX COURS D'EAU

Deux types de sources apportent du P au cours d'eau: les sources ponctuelles et les sources diffuses. Les sources ponctuelles sont par définition localisées en un point de l'espace. Il s'agit principalement des rejets associés aux installations de traitement des effluents urbains domestiques et industriels. Rentrent aussi dans cette catégorie, mais de manière plus marginale, les rejets ponctuels d'origine agricole liés aux fuites en provenance des bâtiments et installations d'élevage. Les sources diffuses, quant à elles, ne sont pas localisées en un point particulier. Elles pénètrent le cours d'eau via des interfaces plus ou moins continus. Le P lessivé des sols agricoles constitue la principale source de P diffus aux cours d'eau, une seconde source plus minoritaire étant constituée par les rejets issus des installations d'assainissement individuels non raccordées.

Parmi les apports diffus d'origine agricole, deux modes de transfert sont à distinguer :

- i) **Les transferts de surface par ruissellement et érosion:** Le P étant introduit dans les sols par le haut, et la phase solide du sol ayant une forte capacité de fixation de cet élément, les horizons superficiels des sols sont le réservoir majeur de P. Le ruissellement de surface a de ce fait la capacité de mettre en mouvement le P d'origine agricole par érosion et transport des particules de sol (mobilisation du P_{part}), les eaux de ruissellement pouvant également s'enrichir en P_{dis} mobilisé par désorption du P_{part} associé à ces particules. Ce type de transfert intervient soit pendant les événements pluvieux intenses liés par exemple aux orages d'été (ruissellement hortonien), soit lors des précipitations hivernales survenant sur des sols saturés en eau. Les temps de transfert jusqu'au réseau hydrographique sont courts (de l'ordre de la crue). Les flux mobilisés et les temps de transfert dépendent de facteurs tels que la couverture végétale et l'état de surface du sol (battance), la pente, ainsi que de la présence ou de l'absence d'un réseau bocager susceptible de jouer le rôle de barrière physique.
- ii) **Les transferts de sub-surface par écoulement des eaux du sol et des eaux de nappe :** L'écoulement de sub-surface concerne principalement les formes dissoutes du P, les formes particulières restant bloquées dans la porosité du sol. Ces transferts concernent le P_{dis} présent dans la solution du sol ou susceptible d'être fourni à cette solution par la phase solide du sol, le vecteur de transport pouvant être les eaux de nappe ou les drains agricoles. Les zones des bassins versants impliquées dans ces transferts sont principalement les zones où les nappes atteignent temporairement ou de manière permanente les horizons superficiels des sols (i.e. là où se trouvent les stocks de P). Dans le contexte de bassins versants développés sur socle imperméable comme c'est le cas en Bretagne, les zones concernées sont principalement les

zones plates de fonds de vallée. Les temps caractéristiques de ces transferts de sub-surface sont plus longs que ceux relatifs aux transferts par ruissellement. Lors des crues, la composante dissoute de sub-surface atteint les rivières généralement quelques heures après la composante particulaire de ruissellement. Ces temps peuvent être cependant très fortement raccourcis si le transfert s'effectue par l'intermédiaire de drains agricoles, les drains pouvant également mobilisés une part non négligeable de P_{part} , à l'inverse des transferts par nappe qui ne mobilisent que du P_{dis} .

On notera que les transferts diffus de P_{dis} agricole par écoulement de sub-surface étaient considérés jusqu'ici comme largement minoritaires par rapport aux transferts diffus de P_{part} . Cette vision tend à changer, des travaux récents ayant montré que les transferts de sub-surface pouvaient représenter jusqu'à 40% du flux total diffus exporté (Jordan-Meille et Dorioz, 2004 ; Dahlke et al., 2012 ; Dupas et al., 2015). Cette évolution est importante, sachant que les transferts de sub-surface mobilisent du P sous forme soluble et donc sous une forme particulièrement réactive et bio-disponible. Deux des enjeux les plus importants des recherches conduites actuellement sur les apports diffus de P agricole au cours d'eau concernent i) la localisation précise des sources de cette composante dans les paysages agricoles et ii) la nature exacte des mécanismes impliqués dans sa formation.

1.3. RAPPELS SUR LES DIFFICULTES GENEREES PAR LA FORTE VARIABILITE TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS SUR LE CALCUL DES FLUX ET L'ESTIMATION DES INCERTITUDES ASSOCIEES

Le transfert du P des sols agricoles vers les cours d'eau étant très lié à la dynamique de l'eau (genèse de phénomènes d'érosion et de ruissellement lors des épisodes de crue, par exemple) et les concentrations en P des sols décroissant très fortement et très rapidement avec la profondeur, il s'ensuit une très forte variabilité des concentrations en P dans les cours d'eau (d'un facteur 10 ou plus) à des pas de temps pouvant être extrêmement court, de l'ordre de, ou inférieure à la durée d'une crue (pas de temps horaire). Quoique concernant à la fois le P_{dis} et le P_{part} , ce phénomène de forte variabilité temporelle des concentrations dans les cours d'eau est amplifié dans le cas du P_{part} , les événements capables de mobiliser cette composante étant des événements de fortes précipitations, par essence très ponctuels dans le temps. Il s'ensuit des variations particulièrement rapides et de très fortes amplitudes des concentrations en P_{part} . La conséquence de ce très fort "bruitage" temporel du signal "concentration en P des rivières" est qu'une fréquence d'échantillonnage journalière ou infra-journalière est généralement nécessaire pour en capturer toute la variabilité, condition nécessaire pour pouvoir calculer des flux précis et évaluer la part des différentes sources impliquées dans la construction du flux (Birgand et al., 2005 ; Johnes, 2007 ;

Cassidy et al., 2011). Cependant, des échantillonnages à fréquence journalière ou infra-journalière sont très difficiles à mettre en place du fait des contraintes techniques et financières qu'ils impliquent. La plupart du temps, les suivis effectués le sont à des fréquences beaucoup plus faibles. Ce hiatus entre fréquences requises et fréquences pratiquées explique en partie le retard actuel de connaissance sur le P.

La Bretagne ne déroge pas à cette difficulté. De fait, les bases de données existantes sur les teneurs en P des rivières bretonnes rassemblent des suivis effectués au mieux à une fréquence hebdomadaire, le plus souvent à une fréquence mensuelle, voire inférieure. Deux questions se posent alors : i) peut-on construire des méthodologies permettant d'estimer des flux relativement précis malgré la basse-fréquence des suivis? ii) Peut-on, à partir de ces mêmes séries basse-fréquences, développer des approches permettant d'estimer de manière réaliste et relativement précise les parts respectives des sources agricoles et urbaines/industrielles dans la construction des flux de P ?

Ces deux questions sont d'importance dans la mesure où de nombreux réseaux de mesure basse-fréquence des concentrations en P sont opérationnels en Bretagne, certains depuis plus de 25 ans. Ces réseaux rassemblent un grand nombre de points de mesure répartis sur toute la région, d'où la possibilité d'obtenir une image relativement haute résolution de la variabilité spatiale de la contamination des eaux par le P à un instant t (possibilité théorique de repérer à partir de là les zones de flux importants ou des actions de reconquête de la qualité de l'eau devraient prioritairement être conduites). Le caractère spatialement dense de ces réseaux de mesure leur confère un caractère précieux, contrebalançant en partie le défaut lié à leur basse-fréquence. L'autre élément important est le point de vue rétrospectif qu'ils offrent, fournissant la possibilité d'analyser également l'évolution dans le temps de la contamination (et donc la possibilité d'évaluer, par exemple, l'impact d'actions concrètes de reconquête de la qualité de l'eau qui pourraient avoir été localement menées).

Un des objectifs de l'étude dont les résultats sont présentés ci-après, est précisément de montrer que des séries basse-fréquences des concentrations en P, quoique imparfaites dans leur construction, peuvent être riches d'information moyennant la mise au point de méthodes de traitement et d'analyse appropriées. Cet objectif rejoint des débats existants à l'heure actuelle dans la littérature internationale (voir Burt et al., 2010) autour des informations extractibles des données basse-fréquences de qualité de l'eau, ces données étant dans bien des cas les seules à disposition pour procéder à une analyse rétrospective de comment la qualité de l'eau a réagi par le passé aux différents facteurs de pression (intensification des pratiques agricoles, accroissement de

l'urbanisation, changement climatique, etc...) et de l'impact qu'ont pu avoir les politiques de reconquête mises en œuvre (mesures agro-environnementales, amélioration de l'assainissement et du traitement des eaux résiduaires, etc.) sur cette qualité.

1.4. OBJECTIFS TECHNIQUES DE L'ÉTUDE ET QUESTIONS PRÉCISES ABORDEES

Les objectifs techniques de l'étude dont les résultats sont présentés ci-après sont triples. Dans un premier temps, il s'agit de collecter toutes les données de concentration en P existantes à l'échelle de la Bretagne et de les rassembler dans une base de données unique, en les couplant aux données existantes de débit. Il s'agit ensuite, à l'aide de méthodologies appropriées, d'utiliser cette base pour estimer les flux de P émis par les bassins versants bretons et d'en estimer les incertitudes ; il s'agit aussi de mettre au point des méthodologies permettant d'estimer les contributions relatives des sources diffuses agricoles et ponctuelles urbaines/industrielles. Dans un troisième temps, enfin, il s'agit d'utiliser les informations produites pour évaluer l'état actuel et l'évolution lors des 25-20 dernières années de la contamination des cours d'eau bretons par le P.

Les questions précises auxquelles l'étude souhaite apporter des réponses sont de trois ordres :

- i) Quels sont les flux de P_{tot} et de P_{dis} émis chaque année aux côtes par les rivières de Bretagne ? Les estimations fournies par la littérature d'un flux annuel émis de P_{tot} de l'ordre de 3000 à 4500 tonnes suivant les années (Aurousseau, 2001 ; CSEB, 2003) sont-elles réalistes ?
- ii) Quelle est l'étendue de la variabilité des flux moyens annuels de P_{tot} et de P_{dis} entre rivières, et comment cette variabilité s'organise-t-elle dans l'espace ? Quelles sont les parts des formes particulières et dissoutes dans les flux ? Comment les flux et leur variabilité spatiale ont-ils évolué lors des 20-25 dernières années ?
- iii) Quelles sont, pour chaque rivière, les parts du flux liées aux sources ponctuelles urbaines/industrielles et diffuses agricoles ? Comment ces parts ont-elles évolué dans la période récente et quelles sont aujourd'hui les marges de manœuvre en termes de réduction des flux de P ?

Au-delà de ces questions génériques, il s'agit aussi de répondre à des questions plus spécifiques comme : i) Existe-t-il un gradient est-ouest des flux de P diffus agricole comme certains auteurs l'ont suggéré (CSEB, 2003) ; ii) Peut-on mettre en relation les variations spatiales des flux de P avec des grandeurs du milieu physique comme la teneur en P des sols ou la sensibilité des sols à l'érosion ?

2. MATERIELS & METHODES

2.1. CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNEES COUPLANT DONNEES PHOSPHORE ET DONNEES DE DEBIT : LA BD COUPLE

La première phase de ce travail a consisté à collecter toutes les données existant en Bretagne sur la teneur en P des cours d'eau et à rassembler ces données au sein d'une base de données unique, comportant également les chroniques de débits de l'eau mesurés à l'endroit ou à proximité des points de mesure des concentrations en P. Est détaillée ci-dessous la façon dont cette base de données, appelée BD COUPLE (COUPLE pour couples CONcentrations en Phosphore – Eaux), a été construite depuis l'identification et la remontée des bases de données source, jusqu'à la sélection des stations présentant une qualité de mesure suffisante pour permettre le calcul de flux fiables, en passant par la construction d'une démarche permettant de jauger de la qualité des associations entre stations de mesure de la concentration en P et stations de mesure des débits de l'eau, dans le cas fréquent d'un éloignement géographique des unes par rapport aux autres.

2.1.1. SOURCES ET CARACTERISTIQUES DES DONNEES DE PHOSPHORE

Plusieurs réseaux de surveillance procèdent à des mesures de la concentration en P des rivières de Bretagne. L'Agence de l'Eau Loire Bretagne (AELB), la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), les Conseils Généraux (CG), l'Agence Régionale de Santé (ARS), les organismes de recherche (Universités, CNRS, INRA) et les structures de bassins versants sont les principaux gestionnaires de ces réseaux. Les objectifs diffèrent suivant les gestionnaires, allant de la simple observation à des objectifs de compréhension des mécanismes et processus impliqués dans la contamination des eaux par le P. Suivant sa finalité ou son opérateur, un réseau de surveillance peut être déployé sur une partie seulement de la région (réseau de suivi d'un contrat de baie ou d'un SAGE, par exemple) ou recouvrir l'ensemble de la Bretagne (Réseau National de Bassin géré par l'AELB, par exemple). Par ailleurs, une même station de mesure peut appartenir à plusieurs réseaux. Les données collectées au niveau de chaque station sont rassemblées pour certaines d'entre elles dans des bases de données structurées. Trois grandes bases structurées existent actuellement en Bretagne:

- i) La base de données OSUR, administrée par l'AELB, regroupe l'ensemble des concentrations en P dont l'acquisition est financée ou cofinancée par l'Agence. Elle consigne les données d'environ 430 stations de mesures en rivières réparties sur toute la Bretagne.

- ii) La base de données SISE-EAUX, base nationale rassemblant tous les contrôles effectués sur les eaux brutes servant à la production d'eau potable, les eaux thermales et les eaux de baignade. Le cadre de cette base est harmonisé à l'échelon national, mais sa gestion se fait aujourd'hui au plan régional (ARS Bretagne, dans le cas présent) après avoir longtemps été assurée à l'échelon départemental par les DDASS. Cette base archive pour la Bretagne les données d'environ 90 points de captage en rivière servant ou ayant servi à l'alimentation en eau potable. Comme la base OSUR, la base SISE-EAUX couvre l'ensemble de la Bretagne.
- iii) La base de données ECOFLUX gérée par l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM). Cette base est plus restreinte que les précédentes, concernant seulement 13 rivières du Finistère, suivies dans le cadre d'un partenariat entre l'IUEM et le CG 29.

La diversité des réseaux, de leurs opérateurs, les différentes échelles de gestion, le caractère non-permanent de certains réseaux ou de certaines stations, induisent une grande hétérogénéité des données rassemblées dans ces trois bases. Cette hétérogénéité se traduit notamment au niveau des fréquences de mesure et de la longueur temporelle des séries, les fréquences et les dates de début des mesures pouvant varier très fortement au sein d'une même base ou entre bases, sans compter la présence parfois d'interruption des suivis au niveau de certaines stations. Ainsi, bien que les premières mesures remontent aux années 1970 et 1980 pour les bases OSUR et SISE-EAUX, très peu de stations montrent une continuité des mesures dans le temps. On note également la présence de fréquences différentes suivant la localisation des stations. Le Tableau 1 montre par exemple que les stations des Côte d'Armor rattachées au réseau SISE-EAUX bénéficient pour la plupart d'une fréquence de mesure bimensuelle en P_{tot} (22.9 mesures par an en moyenne) tandis que dans les autres départements, cette fréquence est beaucoup plus faible (entre 3.0 et 5.4 mesures par an).

		Côtes d'Armor	Finistère	Ille et Vilaine	Morbihan
P dissous	SISE-EAUX	2,9	-	2,7	-
	ECOFLUX	-	41,1	-	-
	OSUR	9,9	9,6	10,6	10,1
P total	SISE-EAUX	22,9	3,0	4,6	5,4
	ECOFLUX	-	-	-	-
	OSUR	10,3	11,0	11,0	11,2

Tableau 1 : Répartition par département des fréquences moyennes annuelles de mesure (en nombre d'échantillons analysés par an) des stations référencées dans les trois bases de données considérées dans cette étude. La base OSUR est relativement homogène d'un département à l'autre, contrairement à la base SISE-EAUX qui montre de forte disparité inter-département. Seule la base ECOFLUX, restreinte au Finistère et au paramètre P_{dis} , dispose d'une fréquence globale moyenne quasi-hebdomadaire. Les autres bases rassemblent des données collectées à une fréquence mensuelle, trimestrielle ou inférieure.

Un bilan global des caractéristiques des données contenues dans les trois bases utilisées dans cette étude (périodes couvertes ; nombre total de stations archivées ; paramètres mesurés ; fréquences des analyses) est présenté dans le Tableau 2. Ce tableau permet de constater que du point de vue des paramètres mesurés, les bases de données OSUR et SISE-EAUX rassemblent à la fois des données de P_{tot} et de P_{dis} , le nombre de données de P_{dis} étant toutefois inférieur au nombre de données de P_{tot} dans la deuxième base, alors que la base de données ECOFLUX ne comporte, elle, que des concentrations en P_{dis} . D'un point de vue longueur temporelle, les trois bases couvrent les périodes suivantes : 1971-actuel (OSUR), 1983-actuel (SISE-EAUX) et 1998-actuel (ECOFLUX). On notera cependant que les débuts de période pour les bases OSUR et SISE-EAUX ne rassemblent qu'un nombre restreint de stations, conduisant à une couverture très limitée du territoire breton. De fait, la couverture spatiale ne devient importante qu'à partir de 1998 (augmentation du nombre de stations suivies avec la mise en place, entre autre, du réseau ECOFLUX), cette date correspondant également à un renforcement des fréquences de mesure au niveau de certaines stations (cas des stations du réseau SISE-EAUX des Côtes d'Armor).

A						
<i>Bases de données</i>						
	OSUR		SISE-EAUX		ECOFLUX	
Extension temporelle maximale de la base	1971-2014		1983-2014		1998-2014	
Nombre total de stations indexées	P_{dis}	P_{tot}	P_{dis}	P_{tot}	P_{dis}	P_{tot}
	361	361	27	80	13	
Fréquence moyenne annuelle (en nombre de mesures par an; toutes stations confondues)	10,0	10,9	2,8	8,9	41,1	
Nombre de stations dont la fréquence est > 10 mesures/an au moins une année hydrologique complète	314		46		13	
B						
Réseaux				Période couverte		
<i>Réseau national de bassin versant de suivi de la qualité des eaux superficielles</i>				1971-2014		
<i>Réseau de suivi de la qualité physico-chimique des eaux superficielles de Bretagne</i>				1989-2014		
<i>Sites de référence des cours d'eau du bassin Loire-Bretagne</i>				2005-2008		
<i>Contrôle de surveillance des cours d'eau du bassin Loire-Bretagne</i>				2007-2014		
<i>Contrôle opérationnel des cours d'eau du bassin Loire-Bretagne</i>				2009-2014		
<i>Réseau de suivi de la qualité des eaux superficielles des Côtes d'Armor</i>				1994-2014		
<i>Réseau de suivi de la qualité des eaux superficielles du Finistère</i>				2007-2014		
<i>Réseau de suivi de la qualité des eaux superficielles d'Ille et Vilaine</i>				1999-2014		
<i>Réseau de suivi de la qualité des eaux superficielles du Morbihan</i>				2002-2014		
<i>Réseau de référence pérennes de la qualité des cours d'eau du bassin Loire-Bretagne</i>				2012-2014		
<i>Réseau d'inventaire des 200 substances</i>				2005-2014		
<i>Réseau complémentaire de suivi de la qualité des eaux superficielles sur le bassin Loire-Bretagne</i>				2007-2014		
<i>Réseau EXCOFLUX</i>				1998-2014		
<i>Réseau SISE-EAUX</i>				1983-2014		

Tableau 2 : A : Caractéristiques principales des trois bases de données utilisées dans cette étude. B : Période de mesure des réseaux constituant ces bases de données. Les périodes couvertes s'arrêtent à l'année 2014, cette année constituant l'année la plus récente d'origine des données au moment de la réalisation de cette étude.

Concernant les fréquences, les Tableaux 1 et 2 illustrent la variabilité des situations et le caractère

généralement basse-fréquence des séries de données remontées. Seule la base ECOFLUX, restreinte au Finistère et au paramètre P_{dis} , dispose d'une fréquence globale moyenne quasi-hebdomadaire. Les deux autres bases de données rassemblent des données collectées à une fréquence mensuelle, trimestrielle ou inférieure. On notera que des suivis complémentaires de ceux effectués par les réseaux de surveillance existent ponctuellement, notamment du fait de certaines structures de bassins versants ou de laboratoires de recherche. Le caractère partiel de ces données, et surtout leur non mise en forme dans des bases de données structurées et accessibles, n'ont toutefois pas permis d'intégrer ces données dans la présente étude.

2.1.2. SOURCE DES DONNEES DE DEBIT

Les chroniques des débits journaliers ont été téléchargées depuis la banque HYDRO, et proviennent de 204 stations de mesure réparties sur l'ensemble de la Bretagne (Fig. 2). Comme pour les réseaux de mesure des concentrations en P, certaines stations ne sont plus en fonctionnement. Ces données sont disponibles à une fréquence journalière avec dans de rares cas, des interruptions de quelques jours à quelques mois, voire années.

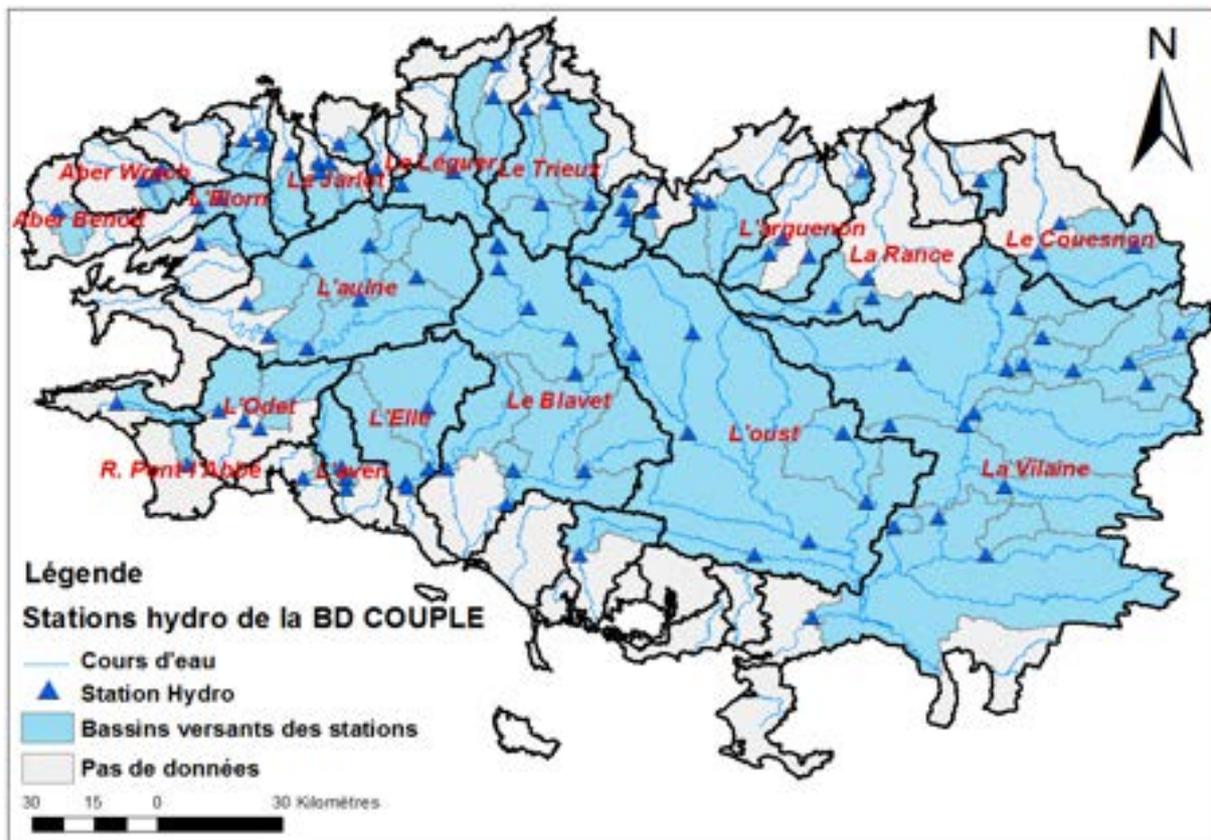


Figure 2 : Localisation géographique des stations hydrologiques de mesure du débit utilisées dans le cadre de cette étude. La liste exhaustive est présentée en annexe.

2.1.3. CARACTERISTIQUES ET PRINCIPES DE CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNEES COUPLE

Au sein de la BD COUPLE, les données sont organisées sous forme de couples station P – station débit. Chaque station P est associée à une ou plusieurs stations débit pour former un, ou des couples, permettant de mettre en relation la dynamique des concentrations en P avec celle des débits. Concrètement, l'association entre stations P et stations débit au sein de la BD COUPLE s'est effectuée en deux temps. Tout d'abord, les chroniques de débit et de concentrations en P des stations issues des différents réseaux de surveillance ont été analysées de manière à ne retenir que les stations obéissant à des critères de qualité prédéfinis. Les stations sélectionnées ont ensuite été intégrées dans la BD, en harmonisant leur format ainsi qu'en associant aux données les métadonnées relatives aux stations et aux mesures. Finalement, le couplage des stations P et débit retenues a été soumis à un ensemble de tests de qualité, tests indispensables du fait de la non concordance géographique d'un nombre important de couples station P – stations débits. Ces différentes étapes sont décrites plus en détail ci-dessous.

CRITERES UTILISES POUR L'INTEGRATION D'UNE STATION PHOSPHORE

Les résultats des analyses de P réalisées sur certaines stations peuvent être manifestement erronés, nécessitant un "nettoyage" des données P par station. Ainsi, lorsque pour le même échantillon, la concentration en P_{dis} est apparue surpasser celle du P_{tot} , les mesures ont été supprimées de la chronique. De même, ont été supprimées les concentrations évoluant en paliers, cette caractéristique suggérant des effets de seuil de limite de détection. Lorsque ces évolutions en palier se sont avérées concerner la totalité d'une chronique, c'est l'ensemble de la station qui a été rejetée. Une fois les chroniques "nettoyées", seules les stations de mesure dont les chroniques de concentrations en P_{dis} et/ou P_{tot} présentaient une fréquence de mesure d'au moins 10 mesures/an pendant au moins une année hydrologique complète ont été conservées, les stations n'obéissant pas à ce critère étant écartées. Le nombre final de stations conservées après ces différents traitements a été de 373 (Tableau 2).

CRITERES UTILISES POUR LE COUPLAGE STATION DEBIT - STATION PHOSPHORE

Toutes les stations P ne disposent pas forcément d'une station débit à proximité immédiate. Dans ce cas, une station proche est recherchée et les débits reconstitués au niveau de la station P en faisant l'hypothèse d'une homogénéité des débits spécifiques au sein des deux aires drainées (station débit et station P). Partant de ce principe, il est possible d'associer une chronique de débit à chaque chronique de concentration en P. L'hypothèse d'homogénéité des débits spécifiques voyant

cependant sa la probabilité de réalisation décroître avec l'éloignement de la station hydrologique de référence, il est clair que tous les couplages n'auront pas la même qualité. Une grille a été mise au point pour qualifier la qualité de chaque couplage effectué. La grille utilisée est inspirée de la littérature et repose sur i) l'écart entre l'aire drainée par la station hydrologique utilisée comme référence et l'aire drainée par la station P, la qualité étant jugée décroître avec l'augmentation de cet écart, et ii) l'appartenance ou non de la station P et de la station débit au même cours d'eau, avec une dégradation du couplage si la station hydrologique utilisée comme référence n'est pas située sur le même cours d'eau que la station P. Dix niveaux de qualité ont au final été définis (Fig. 3), allant du niveau A1 (très bonne estimation probable des débits associés à la station P considérée) au niveau B5 (estimation très incertaine des débits associés à la station P considérée), avec une limite maximale d'écart entre aires drainées fixée à 100%.

Critère de proximité + critère de différence d'aire drainée = code qualité

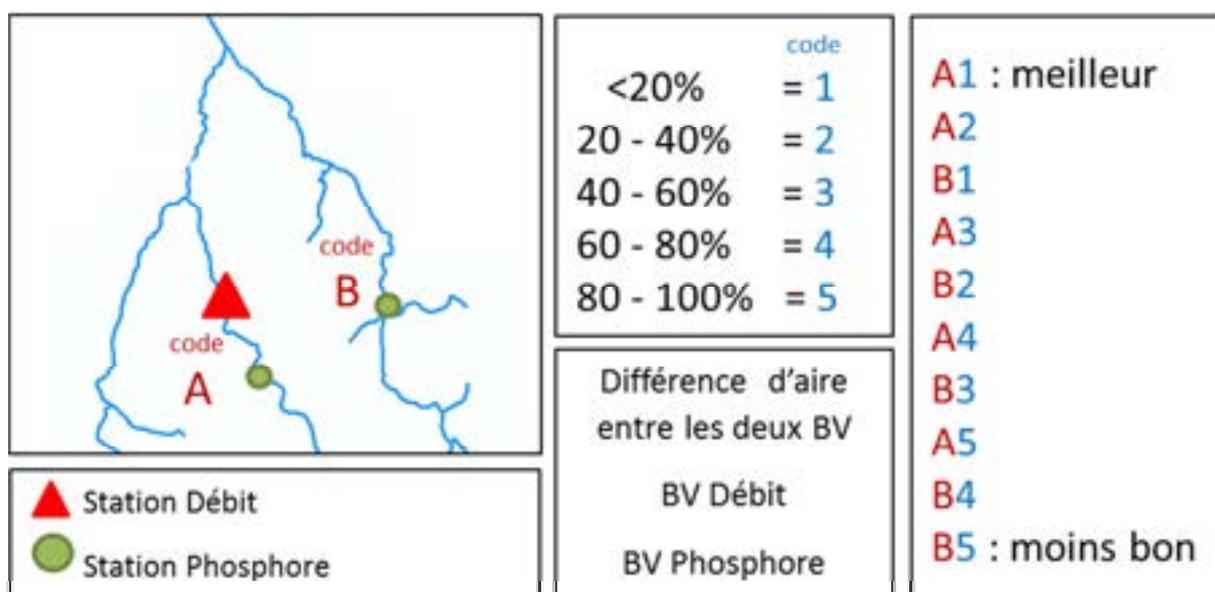


Figure 3 : Méthode utilisée pour estimer la qualité des couples station P – station débit. Le code A est attribué si la station P et la station débit se trouvent sur la même rivière, le code B s'il s'agit d'un affluent ou d'une rivière drainant un bassin versant mitoyen. Les chiffres renvoient aux différences d'aires drainées entre les stations P et débit, le chiffre augmentant avec l'augmentation de la différence.

Partant des 373 stations P et des 204 stations débits remontées pour les rivières de Bretagne, l'application du critère des 100% d'écart maximal entre aires drainées a conduit à la constitution de 392 couples station P - station débit, correspondant à l'association effective de 230 stations P et de 143 stations débit (le nombre final de 392 couples, très supérieur au nombre effectif de 230 stations

P, vient de ce que certaines stations P peuvent être couplées à plusieurs stations de débit avoisinantes). A l'issue de ce premier tri, chaque couple retenu s'est vu attribuer un code de qualité, suivant la codification présentée dans la Figure 3.

Les couplages géographiques effectués ne signifient pas forcément qu'il y ait coïncidence temporelle entre les périodes de mesure de la station P et de la (ou des) station(s) débit voisine(s). Certaines stations P ont pu, par exemple, être actives avant le début des mesures de débit ou inversement. Après prise en compte de ce critère ce sont au final 195 couples station P – station débit qui ont pu être générés au sein la BD COUPLE (195 stations P couplées à 99 stations débit différentes). L'ensemble des couples ainsi constitués est répertorié en annexe, leur répartition géographique étant présentée en carte dans la Figure 4.

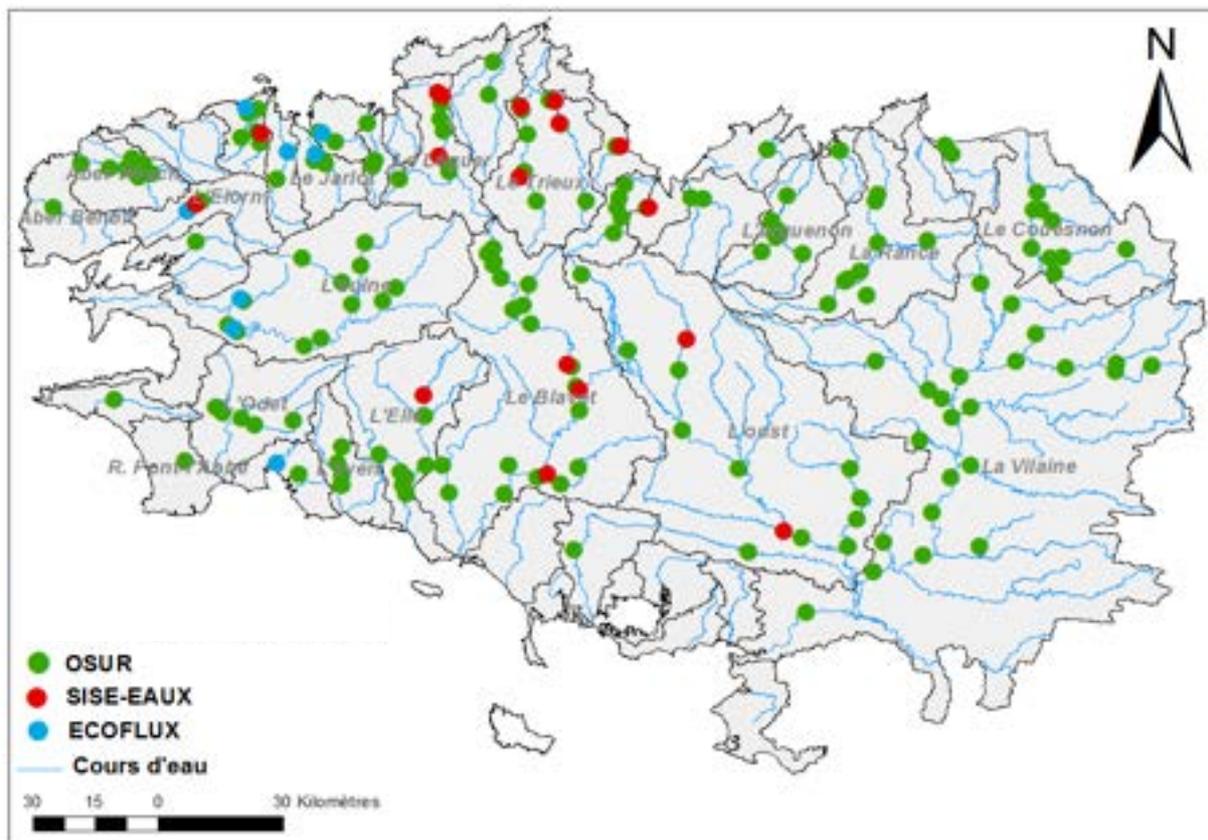


Figure 4 : Localisation géographique des 195 stations P, couplées à une station hydrologiques, finalement intégrées à la BD COUPLE. Les codes couleur indiquent les bases de données d'origine de chaque station. La liste détaillée des stations P et de leurs stations débit de couplage est présentée en annexe, annexe présentant également le code qualité de chacun des 195 couples générés.

TRAÇAGE DES LIMITES DE BASSINS VERSANTS

La détermination précise de l'aire des bassins versants drainés par les stations P et les stations débit a été une étape importante de la construction de la BD COUPLE. Cette grandeur a en effet été nécessaire à plusieurs endroits de cette construction : i) lors de la phase de couplage station P - station débit où l'aire est intervenue dans le calcul du code qualité du couplage ; ii) lors de la phase de calcul des flux pour la reconstitution des débits à l'emplacement de la station P, et iii) lors de la phase de présentation des résultats sous forme cartographique, la valeur du flux étant représentée par un code couleur propagé à la totalité de l'aire drainée au point de calcul du flux.

L'emplacement des stations (débit ou P) ne correspond généralement pas à des exutoires de zones hydrographiques telles que définies par la BD Carthage et ne coïncident pas toujours avec le lit des cours d'eau définis par la couche "cours d'eau" de cette même BD. De plus, les emplacements des cours d'eau de la BD Carthage et ceux déterminés à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) peuvent être différents. Ce problème est récurrent puisque le réseau Carthage n'est pas obtenu à partir d'un MNT (Pella et al., 2008). Il n'est donc pas possible de déterminer correctement les contours des bassins versants à partir des emplacements d'origine des stations fourni par les réseaux de surveillance.

Dans le but de procéder à cette détermination, toutes les stations initiales ayant servi à la construction de la BD COUPLE (373 stations P et 204 stations débit) ont été intégrées dans un système d'information géographique (SIG). Le SIG utilisé s'appuie sur le MNT IGN 100m issu de la BD ALTI® et utilise le système WGS 84 comme système de coordonnées et la projection Transverse Universelle de Mercator (UTM zone 30N) comme mode de projection. Les directions et l'accumulation des flux d'eau ont été déterminées via les outils éponymes disponibles dans ArcGIS® 10.0 pour obtenir le chevelu hydrographique théorique. Toutes les stations ont été projetées à partir des coordonnées géographiques figurant dans leurs bases de données d'origine. Dans le but de pouvoir déterminer les aires drainées à l'amont de toutes les stations P et de débit, et d'obtenir leur contours cartographiques, un repositionnement automatique des stations a été réalisé via l'outil *Capture des points d'écoulements*, suivant le principe décrit dans la Figure 5. Les stations sont repositionnées au centre de la maille du raster "accumulation du flux d'eau" ayant la plus grande valeur dans un rayon de 200 m. La valeur de 200 m est empirique et correspond au rayon du tampon permettant de repositionner le plus de stations possibles en ayant le moins d'incohérences possibles. La petitesse de cette valeur implique une modification mineure de l'emplacement des stations et donc une variation également mineure de l'aire calculée par rapport à celle calculée à partir de la position d'origine de la station. Le repositionnement automatique réalisé est correct pour la majorité

des stations. Cependant certaines stations repositionnées présentent des décalages ou une incohérence avec le réseau hydrographique Carthage. Une vérification et un repositionnement manuel ont donc été effectués pour l'ensemble des stations dans le but de corriger les éventuels artefacts. Les bassins versants associés aux stations P et débit ont ensuite été délimités via la commande *batch watershed delineation* de la boîte à outils Arc Hydro® pour ArcGIS® 10.0 (version 2.0) et les aires correspondantes calculées.

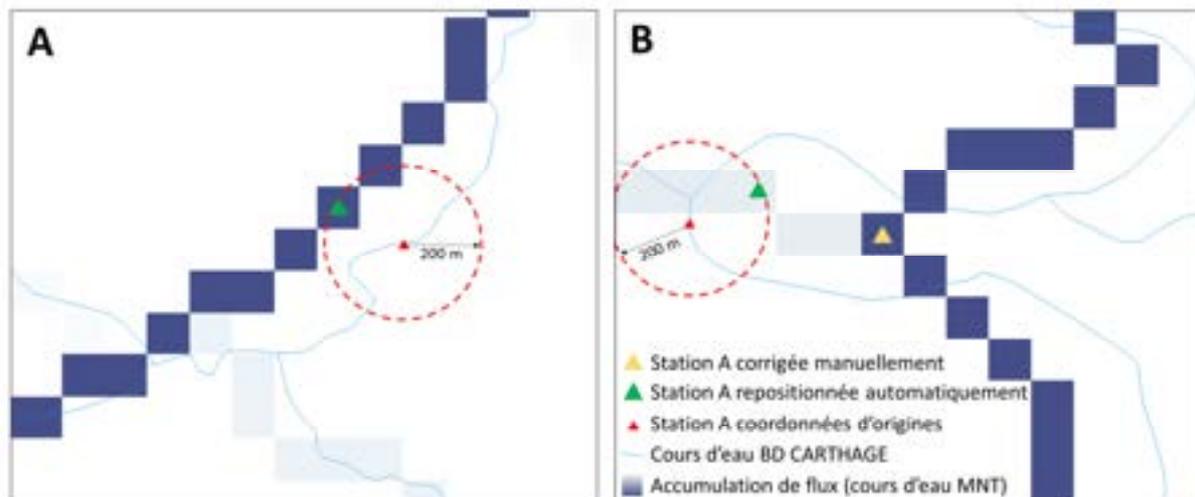


Figure 5 : Schéma explicitant les démarches suivies pour le positionnement des stations P et débit à partir du SIG utilisé. **A :** Cas de figure où le positionnement automatique fonctionne parfaitement. **B :** Cas de figure où une correction manuelle est nécessaire.

La Figure 6 présente les contours des bassins versants drainés par les 195 stations P intégrées au final de la BD COUPLE. Le SIG associé à cette BD permet une représentation en carte des flux de P et de tous les indicateurs relatifs à la pollution des eaux par le P tels que l'on peut les calculer au droit de chacune de ces 195 stations. La technique utilisée dans ce rapport pour construire ces représentations en carte a été de colorier l'aire drainée en amont de chaque station P suivant un code couleur représentatif de la valeur prise par la variable cartographiée au niveau de cette station. La Figure 6 donne un exemple du type de carte produit en considérant, dans l'exemple présenté, la qualité du couplage station P – station débit comme variable cartographiée.

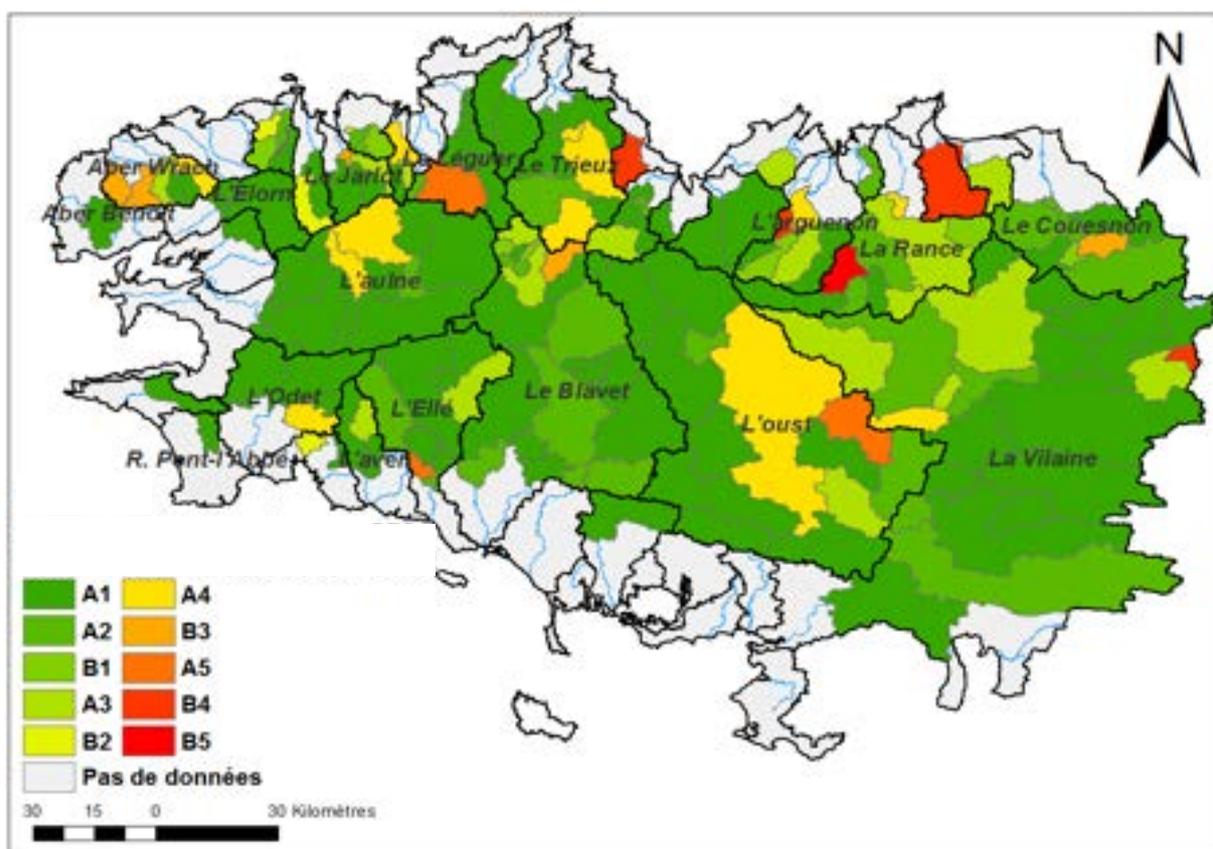


Figure 6 : Contour des bassins versants drainés par les 195 stations P intégrées à la BD COUPLE. Le code couleur renvoie à la qualité du couplage entre station P et station débit.

2.2. METHODES UTILISEES POUR LE CALCUL DES FLUX, L'ESTIMATION DES SOURCES ET DES INCERTITUDES

Les données rassemblées dans la BD COUPLE ont été analysées avec l'objectif de répondre aux questions posées sur la variabilité spatio-temporelle des flux de P (exprimés en flux rapporté à une surface), l'évolution des parts respectives des apports diffus agricoles et ponctuels urbains/industriels, ainsi que sur les parts respectives des flux de P_{dis} et de P_{part} . L'objectif de cette partie est de présenter les méthodes et raisonnements utilisés pour procéder à ces calculs et estimations, les bases théoriques sur lesquelles ces méthodes et raisonnements reposent, ainsi que les approches mises en œuvre pour calculer les incertitudes associées.

2.2.1. LIENS ENTRE DYNAMIQUE HYDRIQUE, FLUX ET SOURCES DU PHOSPHORE : QUELQUES RAPPELS

Comme évoqué plus haut, les transferts de P vers les cours d'eau sont très liés à la dynamique de l'eau. Analyser les relations entre débits et concentrations constitue donc une étape préalable au

choix des méthodes de calcul du flux de P pour une station donnée, notamment dans l'optique de minorer les incertitudes liées à la fréquence souvent trop faible des mesures.

INFORMATIONS PORTEES PAR LES RELATIONS CONCENTRATION-DEBIT QUANT AUX SOURCES POTENTIELLES

Partant de l'analyse d'un grand nombre de rivières, Meybeck & Moatar (2012) ont proposé une analyse du lien existant entre concentrations et débits, en segmentant la courbe de régression $\log(\text{concentration})$ versus $\log(\text{débit})$ (relation C-Q) en deux parties séparées par le débit médian (voir Fig. 7). Trois types de comportements sont identifiés en fonction de l'allure des segments ainsi isolés, fournissant de précieuses indications du point de vue des dynamiques à l'œuvre concernant les apports, ainsi que sur les parts respectives des sources ponctuelles et diffuses dans ces apports:

- i) **Cas d'une relation C-Q négative.** Une telle relation traduit une dilution des concentrations en P avec l'augmentation du débit. Une telle relation indique que l'apport de P à la rivière est constant ou augmente peu lorsque le débit augmente (d'où la dilution des concentrations). C'est typiquement ce que l'on attend d'une rivière principalement influencée par des rejets ponctuels de P de type station d'épuration, rejets dont les débits sont globalement constants au cours de l'année et non inféodés au débit de l'eau.
- ii) **Cas d'une relation C-Q positive.** Une telle relation correspond à une augmentation des concentrations avec l'augmentation du débit de l'eau. Une relation de cette nature indique que les processus hydrologiques impliqués dans l'augmentation du débit sont responsables de la mobilisation d'importantes quantités de P. Cette situation correspond typiquement à ce que l'on attend d'un épisode pluvieux engendrant l'érosion et le transfert vers le cours d'eau de particules de sols riches en P: plus les transferts sont importants, plus les particules apportées à la rivière augmentent la concentration en P de celle-ci. Grossièrement et en première approximation, un tel effet d'augmentation de la concentration quand le débit augmente est typiquement ce que l'on attend d'une rivière sous influence d'apports diffus agricoles importants.
- iii) **Cas d'une relation C-Q de pente nulle.** Il n'y a ni dilution ni augmentation marquée de la concentration en P avec le débit. Ceci peut traduire soit la superposition des deux contextes précédemment décrits, soit un effet d'épuisement rapide du réservoir diffus mobilisé par ruissellement et érosion.

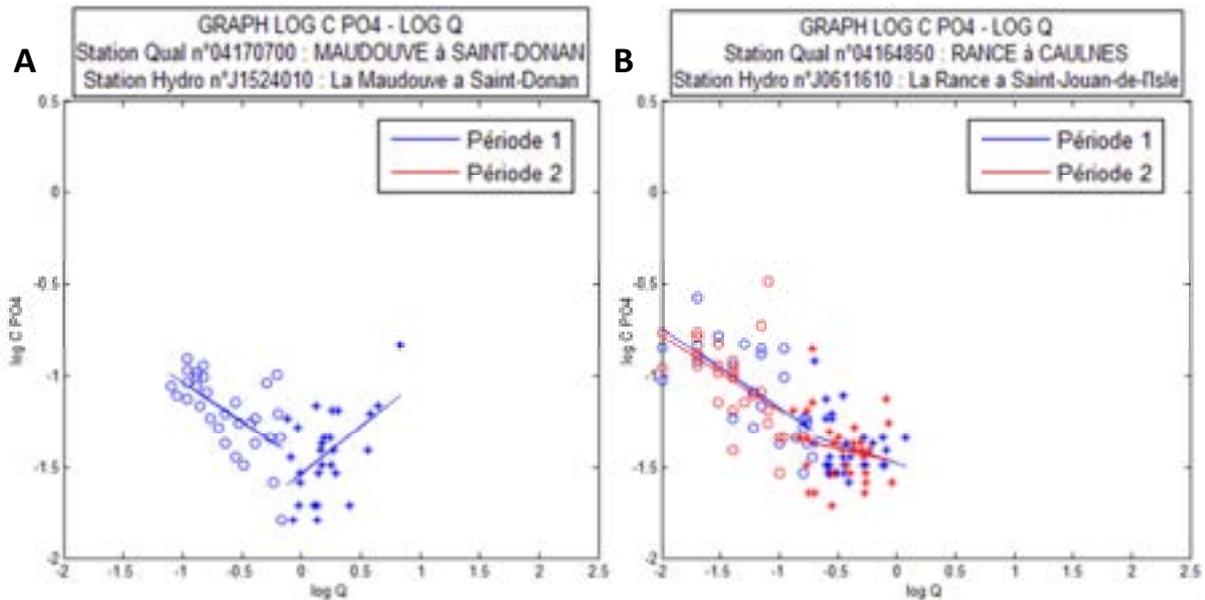


Figure 7 : Exemple de relations C-Q pour deux rivières. A : La Maudouve à Saint Donan montre deux types de relation, négative ou positive, suivant que les débits sont supérieurs ou inférieurs au débit médian. B : La relation C-Q de la Rance à Caulnes montre, elle, uniquement une pente négative, quel que soit le débit. Ces différences renvoient à des sources du P probablement différentes pour ces deux rivières.

A partir de ces relations concentration-débit, Raymond et al. (2013) proposent le calcul de deux grandeurs - $b50_{inf}$ et $b50_{sup}$ – correspondant aux pentes de la relation $\log(\text{concentration})$ versus $\log(\text{débit})$ pour des débits respectivement inférieurs ($b50_{inf}$) et supérieurs ($b50_{sup}$) au débit médian. Ces grandeurs, permettant de quantifier les relations C-Q, sont déduites des relations :

$$\log C = b50_{inf} * \log Q + a50_{inf} \quad (1)$$

$$\log C = b50_{sup} * \log Q + a50_{sup} \quad (2)$$

Ces grandeurs permettent une approche quantitative des différences de sources qualitativement évoquées ci-dessus. Un $b50_{sup}$ positif indiquera en effet que les processus hydrologiques responsables de l'augmentation du débit sont à l'origine de la mobilisation d'une source riche en P (source diffuse agricole type "érosion des sols"). Au contraire, un $b50_{sup}$ négatif témoignera de l'absence ou de la faible importance de cette source supplémentaire de P, illustrant un découplage entre processus hydrologiques en période de fort débit et apport de P à la rivière (dominance des sources ponctuelles).

LIENS ENTRE REACTIVITE HYDROLOGIQUE, REPARTITION INTRA-ANNUELLE DU FLUX ET SOURCES DU PHOSPHORE

Le ruissellement étant un processus apte à transférer de grandes quantités de P à la rivière, on peut

s'attendre à ce que des bassins versants propices à déclencher des épisodes intenses de ruissellement soient aussi de gros contributeurs de P diffus agricole au cours d'eau. Des auteurs ont cherché à exprimer cette sensibilité des bassins versants au ruissellement en générant des indicateurs traduisant la réactivité hydrologique d'un bassin versant, c'est-à-dire sa capacité à transformer la pluie en écoulement rapide de surface. Un de ces indicateurs est l'indicateur $W_{2\%}$ (Raymond et al., 2013), qui exprime le pourcentage du flux d'eau cumulé annuel écoulé en seulement 2% du temps. Un $W_{2\%}$ élevé indique un bassin versant très réactif au sein duquel les processus hydrologiques à l'œuvre sont principalement des processus de surface de type ruissellement (peu ou pas de stockage souterrain de l'eau). Au contraire, un $W_{2\%}$ faible indique un bassin versant peu réactif, dans lequel l'eau de pluie est principalement stocké en profondeur et restituée lentement au cours d'eau.

La conjugaison de cet indicateur avec la grandeur $b50_{sup}$ permet de calculer un autre indicateur, l'indicateur $M_{2\%}$, exprimant la part du flux de P exporté en 2% du temps. De fait, Raymond et al. (2013) ont montré l'existence d'une relation universelle empirique reliant ces trois variables, comme suit :

$$M_{2\%} = W_{2\%} + 27,65 * b50_{sup} \quad (R^2 = 0,85) \quad (3)$$

Cette relation a été établie en compilant les données de débit et de concentration en P obtenues pour 125 bassins versants suivis au pas de temps journalier et ayant des réactivités hydrauliques très contrastées. Le R^2 de la relation est de 0,85. La relation indique qu'un bassin versant très réactif d'un point de vue hydrologique et voyant sa concentration en P fortement augmenter avec le débit aura tendance à exporter une fraction très importante de son flux annuel de P pendant un temps très courts. Ceci aura évidemment des conséquences en matière de fréquence de suivi, un tel bassin versant nécessitant une haute-fréquence de suivi pour capturer au plus juste le flux annuel émis. Ceci aura également des conséquences du point de vue des sources potentielles, un bassin versant à forte valeur de $M_{2\%}$ étant de fait un bassin versant logiquement dominé par des apports diffus de P transférés par ruissellement et érosion, d'où une dominance probable des sources agricoles.

HYDROCLIMAT, HYDRAULICITE ET FLUX DE PHOSPHORE

D'une année à l'autre, les débits écoulés ne sont pas identiques à cause des variations climatiques, et notamment du volume des précipitations. Ces variations vont engendrer des variations des flux, indépendantes des variations liées à des changements dans les pressions exercées par les différentes sources. L'hydraulicité est un indice permettant d'évaluer la variabilité de la composante climatique du flux en comparant chaque année hydrologique à une année hydrologique de référence,

généralement assimilée à la moyenne des débits annuels calculées sur une période suffisamment longue pour intégrer la variabilité de l'hydroclimat, comme suit :

$$\text{Hydraulicité}_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}} \quad (4)$$

Où : Q_i la lame d'eau de l'année i et \bar{Q} la lame d'eau moyenne interannuelle

Une valeur de 1 correspond à une année hydrologique que l'on qualifiera de moyenne. Un indice d'hydraulicité supérieur à 1 correspond à une année hydrologique humide, un indice d'hydraulicité inférieure à 1 correspondant à l'inverse à une année hydrologique sèche. Si l'indice est très largement inférieur (ou supérieur) à 1, l'année devra être considérée comme exceptionnelle d'un point de vue hydroclimatique. Toute corrélation positive ou négative entre l'hydraulicité et le flux de P sera symptomatique d'un contrôle hydroclimatique fort de ce flux. A l'inverse, des évolutions de flux à hydraulicité constante seront indicatrices d'un contrôle prépondérant des facteurs de pression liés aux sources sur le flux, type teneurs en P des sols ou pression d'assainissement. D'où l'importance de calculer et de prendre en compte ce paramètre hydraulicité dans l'analyse des données de flux.

2.2.2. CALCUL DES FLUX ET ESTIMATION DES INCERTITUDES

Comme évoqué précédemment, les données incluses dans la BD COUPLE sont pour la plupart des données basse à très basse fréquence. Ce faisant, on sait que les flux calculés seront entachés d'incertitudes forcément assez élevées, incertitudes qu'il convient d'évaluer et si possible de réduire au maximum. Pour cela, il importe de passer en revue les méthodes disponibles dans la littérature scientifique pour calculer les flux en minimisant les incertitudes et de sélectionner les plus appropriées au contexte breton.

CHOIX DES METHODES DE CALCUL DE FLUX

La littérature scientifique propose un grand nombre de méthodes permettant d'estimer les flux d'éléments particuliers ou dissous à partir des mesures ponctuelles de la concentration en cours d'eau. A partir des variables descriptives de la réactivité hydrologique définies précédemment (relation C-Q ; variables $W_{2\%}$ et $b_{50_{su}}$), Raymond et al. (2013) ont proposé une matrice d'aide au choix de la meilleure méthode de calcul du flux permettant de minimiser les incertitudes (matrice présentée en annexe).

Dans cette étude, $W_{2\%}$ et $b_{50_{sup}}$ ont été calculés pour l'ensemble des couples station P - station débit pour les paramètres P_{tot} et P_{dis} . Au regard de la matrice d'aide à la décision, les valeurs

obtenues pour ces deux indicateurs ont montré que la méthode DWC (DWC pour Discharge Weighted Concentration) était la plus adaptée pour le calcul des flux de P_{dis} alors que deux méthodes, DWC et SRC (SRC pour Segmented Rating Curve) étaient conseillées suivant les cours d'eau pour le calcul des flux de P_{tot} .

MÉTHODE DWC (DISCHARGE-WEIGHTED CONCENTRATION)

Cette méthode, aussi appelée Méthode 5 dans la littérature, calcule le flux comme le produit des concentrations moyennes pondérées par les débits, multiplié par le débit moyen :

$$F_{DWC} = K * \frac{\sum_{i=1}^n C_i * Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} * \bar{Q} = K * C * \bar{Q} \quad (5)$$

avec, C_i la concentration mesurée (mg/L), Q_i le débit mesuré (m^3/s), \bar{Q} le débit moyen (m^3/s), n le nombre de prélèvements et K le coefficient de correction de l'aire entre la surface du bassin versant P et la surface du bassin versant débit. Cette méthode a été utilisée entre autres par Verhoff et al. (1980) et Walling & Webbs (1981).

L'incertitude associée à cette méthode est définie par Walling and Webb (1981) à partir de la distribution des différences e , entre le flux simulé et le flux de référence obtenu à partir d'une chronique journalière ($e = 100 * (F_{sim} - F_{ref})/F_{ref}$). L'incertitude est ensuite caractérisée par l'imprécision (différence entre e_{90} et e_{10} , respectivement les 90^{ème} et 10^{ème} percentiles de e) et le biais considéré comme étant équivalent à la valeur e_{50} (50^{ème} percentiles de e). En l'absence de données journalières de référence (cas de la BD COUPLE), Moatar et al. (2012) proposent des abaques (voir annexe) permettant d'exprimer e_{10} , e_{90} et e_{50} en fonction de la valeur prise par la variable $M_{2\%}$, et cela pour chaque fréquence de mesure disponible et chaque période de calcul choisie (1 an, 3 ans ou 5 ans). C'est cette méthode des abaques que nous avons utilisée dans cette étude pour déterminer les incertitudes des flux calculés avec la méthode DWC et corriger ces flux du biais.

MÉTHODE SRC50* (SEGMENTED RATING CURVE)

Les méthodes de type SRC se basent sur la régression des segments générés par la relation C-Q. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode SRC50* qui segmente cette relation par le débit médian, Q_{50} , auquel fait référence le "50" et dont la régression est corrigée par un coefficient symbolisé par le symbole étoile (*) dans le nom de la méthode. Par soucis de simplification, cette méthode sera simplement référencée sous le sigle SRC dans le reste du rapport. Cette méthode calcule dans un premier temps les pentes des régressions définies par les valeurs en dessous ($b_{50_{inf}}$) et au-dessus

($b_{50_{sup}}$) du débit médian Q_{50} . Les concentrations sont ensuite reconstituées pour chaque mesure de débit en utilisant les régressions appropriées :

$$\log \hat{C} = b_{50_{inf}} * \log Q + a_{50_{inf}} \text{ si } Q < Q_{50} \quad (6)$$

$$\log \hat{C} = b_{50_{sup}} * \log Q + a_{50_{sup}} \text{ si } Q > Q_{50} \quad (7)$$

Les flux annuels sont ensuite calculés en sommant le produit des débits et des concentrations reconstituées (pour les jours non-échantillonnés pour la mesure du P) et des concentrations mesurées (pour les jours échantillonnés). Le facteur de correction de Ferguson (CF) est appliqué aux deux régressions effectuées pour corriger la sous-estimation due à la transformation logarithmique (Fergusson,1986). Au final, le flux est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$F_{SRC} = K * CF \left\{ \sum_{i=1}^{365-n} \hat{C}_i * Q_i + \sum_{i=1}^n C_i * Q_i \right\} \quad (8)$$

avec F_{SRC} le flux annuel calculé avec la méthode SRC, C_i la concentration mesurée (mg/L), \hat{C}_i la concentration estimée (mg/L), Q_i le débit mesuré (m^3/s), n le nombre de prélèvements, K le coefficient de correction de l'aire entre la surface du bassin versant phosphore et la surface du bassin versant débit, et CF le coefficient de Ferguson défini par $CF = \exp(2.651\sigma^2)$.

L'incertitude sur les flux calculés est dépendante de la qualité de la relation C-Q. Si le nuage de point est dispersé autour de la droite de régression, l'incertitude est forte ; si le nuage est dense et resserré autour de la droite, l'incertitude est faible. L'écart-type σ_{SRC} des différences entre les concentrations mesurées et les concentrations reconstituées est calculé. L'incertitude est calculée en faisant l'hypothèse d'une distribution normale des erreurs. A partir de cette hypothèse, il est possible de calculer un intervalle de confiance ayant 80% de chance de contenir la vraie valeur de concentration. Les bornes des intervalles de confiance de chaque valeur de concentration estimée calculées à partir de σ_{SRC} (9) servent ensuite à calculer deux valeurs de flux ; une valeur d'estimation haute (10) et une valeur d'estimation basse (11). La différence en % entre ces deux bornes de l'intervalle de confiance et la valeur de flux estimée sont $SRCE_{10}$ et $SRCE_{90}$ (12), les incertitudes inférieures et supérieures. Le biais est nul avec cette méthode.

$$\hat{C}_{i_{haut}} = \hat{C}_i + 1.28 * \sigma_{SRC} \quad \text{et} \quad \hat{C}_{i_{bas}} = \hat{C}_i - 1.28 * \sigma_{SRC} \quad (9)$$

$$F_{SRC \text{ IC } haut} = K * CF \left\{ \sum_{i=1}^{365-n} \hat{C}_{i_{haut}} * Q_i + \sum_{i=1}^n C_i * Q_i \right\} \quad (10)$$

$$F_{SRC \text{ IC } bas} = K * CF \left\{ \sum_{i=1}^{365-n} \hat{C}_{i_{bas}} * Q_i + \sum_{i=1}^n C_i * Q_i \right\} \quad (11)$$

$$SRCe_{10} = F_{SRC} - F_{SRC\ IC\ bas} \quad \text{et} \quad SRCe_{90} = F_{SRC} - F_{SRC\ IC\ haut} \quad (12)$$

avec $F_{SRC\ IC}$ les bornes hautes(_{haut}) et basses(_{bas}) de l'intervalle de confiance à 80% du flux annuel calculé avec la méthode SRC, $SRCe_{10}$ l'imprécision inférieure sur le flux annuel, $SRCe_{90}$ l'imprécision supérieure sur le flux annuel, C_i la concentration mesurée (mg/L), \hat{C}_i la concentration estimée (mg/L) avec ses valeurs hautes(_{haut}) et basses(_{bas}) à 80%, σ_{SRC} l'écart-type des erreurs entre concentrations estimées et concentrations mesurées, Q_i le débit mesuré (m^3/s), n le nombre de prélèvements, K le coefficient de correction de l'aire entre la surface du bassin versant phosphore et la surface du bassin versant débit, et CF le coefficient de Ferguson défini par $CF = \exp(2.651\sigma^2)$.

MINORATION DES INCERTITUDES

Le caractère basse-fréquence de la plupart des données intégrées à la BD COUPLE implique une incertitude élevée sur le calcul du flux s'il est calculé de manière annuelle ($>\pm 50\%$), puisque dans la plupart des cas, seulement 12 données sont disponibles par année hydrologique. De fait, la méthode SRC nécessite une bonne relation C-Q pour réduire l'incertitude, bonne relation très difficile à obtenir avec seulement 12 données; les abaques de la méthode DWC, quant à elles, révèlent des incertitudes fortes sur le flux ($>\pm 50\%$) pour des mesures mensuelles réparties sur une année seulement. Cependant, l'incertitude peut être diminuée avec cette méthode si le flux est calculé non pas sur une base annuelle, mais sur une base pluriannuelle (accroissement de la probabilité de capter toute l'étendue de variation du spectre des concentrations en P). C'est également vrai dans le cas de la méthode SRC où l'augmentation de la période de temps considérée conduit à une meilleure définition de la relation C-Q. Cet allongement de la période de calcul du flux ne peut se faire que pour des stations ne montrant pas d'évolution temporelle rapide, à la hausse ou à la baisse, du flux, ou si tel est le cas, en prenant soin de maintenir la période de calcul dans une gamme de temps suffisamment resserrée pour que les flux puissent être considérés comme stationnaires sur la période retenue. Cette procédure est un moyen d'exploiter et de valoriser des séries de mesures basse-fréquences telles que celles rassemblées dans la BD COUPLE, pour peu que celles-ci soient suffisamment longues pour être découpées en tronçons pluriannuels.

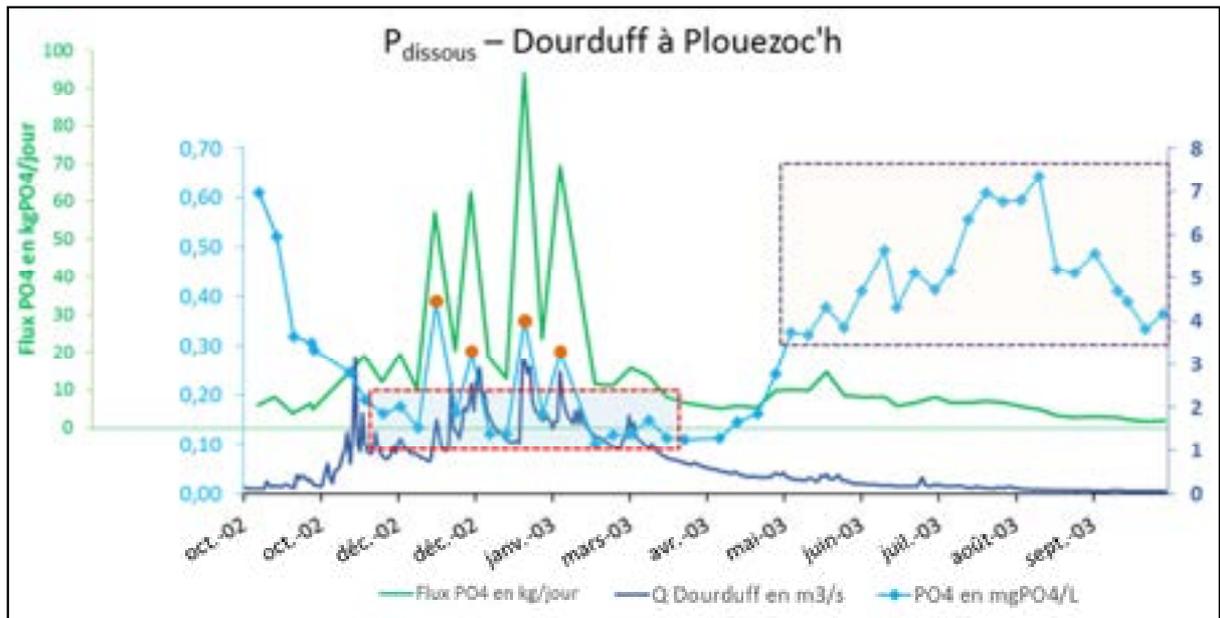
Dans cette étude, des tronçons de 5 années hydrologiques consécutives ont été choisis comme base pour calculer des flux moyens annuels en minorant les incertitudes, cette durée de 5 années représentant le meilleur compromis possible entre incertitude et stabilité du flux. Cinq périodes successives ont été considérées : 1987-1991 ; 1992-1996 ; 1997-2001 ; 2002-2006 ; 2007-2011. S'agissant d'années hydrologiques, les années commencent en octobre d'une année pour s'achever

en septembre de l'année suivante. Ainsi la période 1987-1991 contient les 9 premiers mois de l'année 1992. Pour être retenue, une station devait impérativement satisfaire deux critères : i) disposer au moins d'une fréquence de 10 mesures par an de la concentration en P_{dis} et/ou P_{tot} et de 360 mesures du débit par an ; ii) disposer d'au moins 4 années de données répondant au premier critère sur au moins une des cinq périodes de 5 ans considérées. La longueur variable des séries suivant les stations fait que l'application de ces critères a conduit à retenir des nombres de couples station P – station débit variables par périodes de cinq années, et suivant le paramètre retenu (P_{dis} ou P_{tot}). A noter que pour les couples appartenant au réseau ECOFLUX, une analyse séparée a été effectuée. La fréquence de mesure plus élevée de ce réseau autorise en effet à calculer des flux de manière annuelle en limitant l'incertitude. Les calculs de flux ont donc été effectués sur une base annuelle pour les stations de ce réseau, entre les années hydrologiques 1998 et 2011, et ce, en utilisant la méthode DWC, les incertitudes et les biais étant calculés à partir de l'abaque de Moatar et al. (2012).

2.2.3. ESTIMATION DES COMPOSANTES DIFFUSES AGRICOLES ET PONCTUELLES URBAINES/INDUSTRIELLES DU FLUX

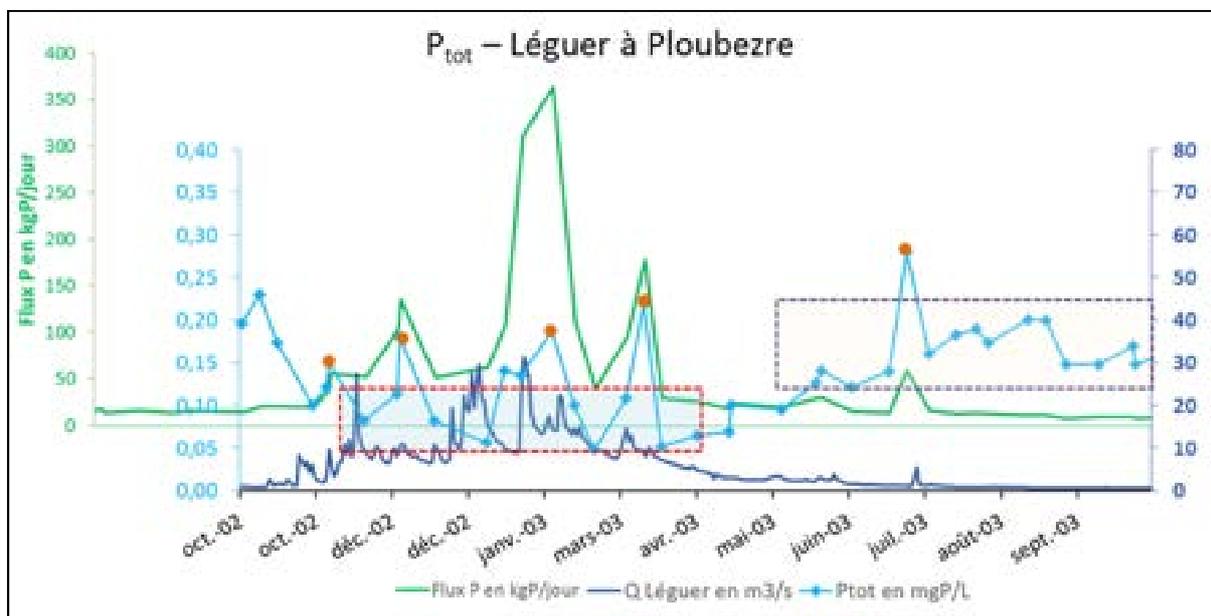
Comme cela a déjà été précisé partie 1.2, le P présent dans un cours d'eau au temps t provient à priori de différentes sources (agricoles, domestiques, industrielles), transférées de différentes manières (ponctuelles ou diffuses) et par différents processus (transfert de surface, transfert de sub-surface,...). Le point clé à considérer ici est que la contribution de ces différentes sources n'est pas constante dans le temps mais varie en fonction du moment de l'année hydrologique considérée, et des conditions hydroclimatiques au sein de ce moment. Cette variabilité temporelle dans la part des sources est facilement repérable dans les chroniques de concentration dans la mesure où elle induit des variations de concentration en phase avec les variations de débit. Une illustration en est donnée dans les Figures 8 et 9 présentant les chroniques de concentration en P_{dis} et en P_{tot} obtenues pour deux rivières représentatives du contexte breton, la Dourduff (Fig. 8) et le Léguer (Fig. 9). Ces deux chroniques montrent que la variabilité temporelle des concentrations en P_{dis} et en P_{tot} peut se décomposer en trois "moments" particuliers au sein de l'année hydrologique :

- i) Des maxima ponctuels de concentration en phase avec les épisodes de crue (pics de débits) et correspondant à des flux forts ;
- ii) Des minima de concentrations en période hivernale, hors périodes de crues, correspondant à des flux modérés à faibles ;
- iii) Des maxima de concentration en période estivale, hors périodes de crues ; correspondant à des flux faibles à très faibles.



Maxima de concentration
 Minima de concentration
 ● Pics ponctuels de crue

Figure 8 : Exemple de variation intra-annuelle des concentrations et des flux instantanés de P_{dis} en parallèle des variations de débit pour une rivière caractéristique du contexte breton. Le cas présenté est le couple station P – station débit "la Dourduff à Plouezoc'h". L'année hydrologique présentée est l'année hydrologique 2002-2003. Les figurés permettent d'identifier les "moments" particuliers signalés dans le texte.



Maxima de concentration
 Minima de concentration
 ● Pics ponctuels de crue

Figure 9 : Exemple de variation intra-annuelle des concentrations et des flux instantanés de P_{tot} en parallèle des variations de débit pour une rivière caractéristique du contexte breton. Le cas présenté est le couple station P – station débit "le Léguer à Ploubezre". L'année hydrologique présentée est l'année hydrologique 2002-2003. Les figurés permettent d'identifier les "moments" particuliers signalés dans le texte.

Comme le montre la Figure 10, l'alternance de ces maxima et minima de concentration constitue l'essence de la variabilité intra-annuelle des concentrations en P dans les rivières de Bretagne, laquelle, par sa répétition interannuelle, construit et explique la forme des séries pluriannuelles de concentration.

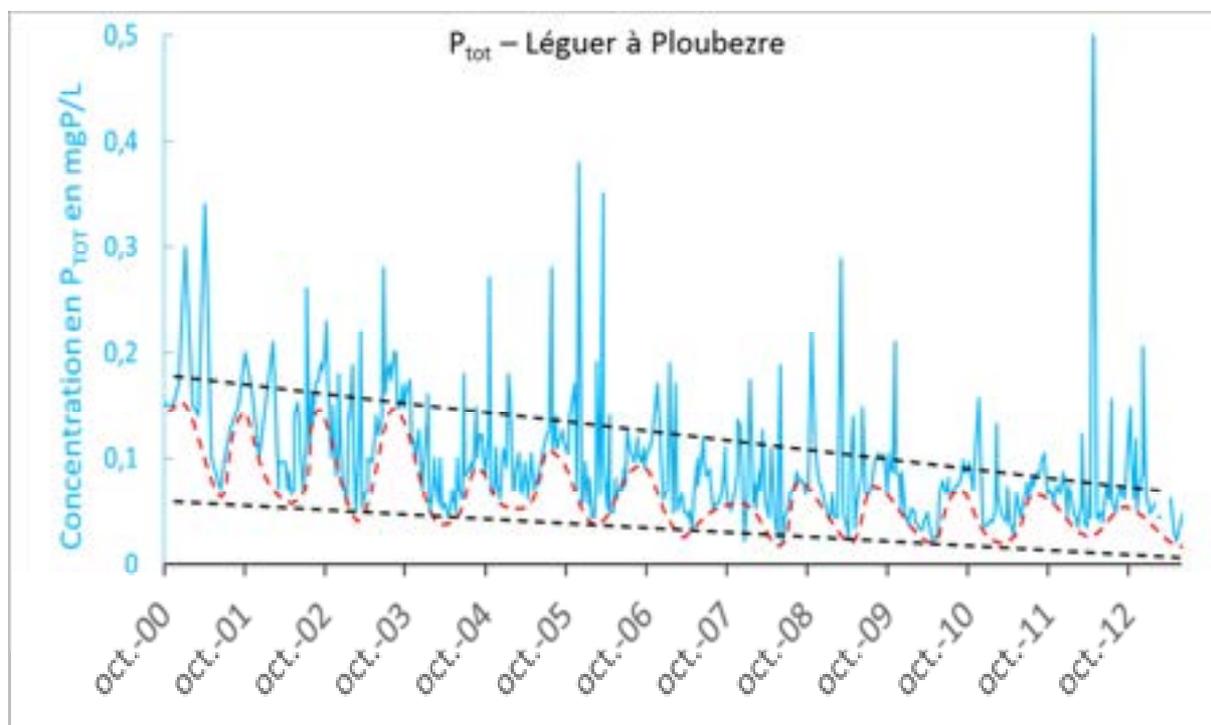


Figure 10 : Evolution entre 2000 et 2012 des concentrations en P_{tot} pour le couple station P – station débit "le Léguer à Ploubezre". Les traits pointillés rouges soulignent le signal saisonnier intra-annuel décrit par les données hors crue, ponctuées par une alternance de minima hivernaux et de maxima estivaux, signal auquel se superposent les pics de concentration ponctuels observés pendant les épisodes de crue. Les traits pointillés noir soulignent la tendance à la diminution dans le temps des minima et maxima de concentration hors-crue enregistrées au niveau de cette station.

L'intérêt du repérage de ces "moments" particuliers est que chacun correspond à une maximisation d'une source et/ou d'un processus de transfert en particulier, ainsi qu'à une maximisation des formes, particulières ou dissoutes, du P, à savoir :

- i) les maxima de concentration observés lors des crues, notamment lors des crues survenant dans la période hiver-printemps, correspondent à des moments de maximisation des apports diffus de P d'origine agricole induits par le déclenchement de processus de ruissellement à la surface des sols en réponse aux précipitations ; l'amplitude de ces apports dépend de facteurs tels que le type de sol, la pente, l'intensité des pluies, la connectivité des parcelles à la rivière, etc. La littérature scientifique indique que le P exporté lors de ces moments de fort export est attendu être majoritairement constitué de formes particulières du P ;

-
- ii) Les minima de concentration observés en hiver et au printemps, hors périodes de crue, correspondent à une maximisation des apports diffus de P d'origine agricole par transfert de sub-surface ; en effet, ces moments correspondent à des périodes de l'année où les nappes sont connectés à la rivière et remontent vers les horizons superficiels des sols là où est stocké le P ; cette composante véhiculant essentiellement du P_{dis} (Jordan-Meille et Dorioz, 2004 ; Dahlke et al., 2012 ; Dupas et al., 2014) ; on s'attend à ce que ces moments s'accompagnent d'une augmentation de la part dissoute du flux ;
 - iii) les maxima de concentrations estivaux, enfin, correspondent à une maximisation des apports ponctuels, urbains et industriels ; en effet, lors de ces "moments" les sols agricoles sont hydrologiquement déconnectés des cours d'eau ; il s'ensuit une maximisation de la composante ponctuelle, urbaine et industrielle du flux, composante par ailleurs présente toute l'année, mais très fortement diluée en hiver et au printemps, ainsi que pendant les crues ; cette composante est attendue être majoritairement composée de formes dissoutes du P.

Partant de ces variations et dynamiques temporelles, une segmentation des chroniques en période de dominance d'une source ou d'une forme peut permettre de calculer les flux liés à une source et/ou une forme en particulier. Ainsi, le calcul du flux d'étiage et sa propagation sur toute l'année hydrologique fournit un moyen d'approcher la part des sources ponctuelles urbaines et industrielles dans le flux total annuel (en faisant l'hypothèse d'une stationnarité des apports ponctuels urbains/industriels sur l'année). A l'inverse, la sommation du flux transmis pendant les crues fournit un moyen d'approcher la part du flux annuel lié au ruissellement sur surface agricole, la sommation des flux transmis pendant les inter-crues d'hiver-printemps (diminuée du flux urbain/domestique permanent) permettant, elle, d'approcher la part du flux agricole dissous de sub-surface dans le flux total annuel. Une fois effectuées, les décompositions proposées ont en théorie la capacité de pouvoir comparer la part des différentes sources et composantes constituant le flux de P au sein d'un bassin versant et entre bassins versants, permettant ainsi d'effectuer une analyse de la variabilité des apports diffus agricoles et ponctuels urbains/industriels à l'échelle de la Bretagne et de la façon dont cette variabilité a évolué au cours du temps.

OUTILS POUR EXTRAIRE LES "MOMENTS" HYDROLOGIQUES MAJORANT UN TYPE DE SOURCE OU UN TYPE DE MECANISME DE TRANSFERT

L'isolement des différentes composantes décrites plus haut nécessite d'extraire les analyses correspondant à chacun des trois "moments" hydrologiques durant lesquels leur apport au cours d'eau est maximisé. Pour ce faire, un algorithme de séparation des débits a été conçu à partir d'une

structure conditionnelle à trois tests permettant une sélection rigoureuse des temps t appartenant aux trois "moments" hydrologiques définis ci-dessus. Ce test analyse la variation du débit pour chaque temps t en utilisant l'équation suivante :

$$\frac{dQ}{Q} t = |(Q_t - Q_{t-1})/Q_{t-1}| \quad (13)$$

avec Q le débit et $\frac{dQ}{Q}$ la valeur absolue de la variation du débit.

Les trois tests de la structure conditionnelle d'appartenance aux "moments" sont les suivants :

i) Appartenance au "moment" de crue :

$$\left[\left\{ \frac{dQ}{Q} t > \frac{dQ}{Q} 75 \right\} \text{ ET } \{Q_t > Q_{15}\} \right] \text{ OU } \{Q_t > Q_{85}\} \quad (14)$$

Ce test permet de cibler les dates pour lesquelles les variations de débits sont fortes (i.e. > 75^{ème} percentile des variations) ou pour lesquelles les débits sont forts (i.e. > Q85).

ii) Appartenance au "moment" d'étiage :

$$\left[\left\{ MM \frac{dQ}{Q} t < MM \frac{dQ}{Q} 50 \right\} \text{ ET } \{Q_t < Q_{30}\} \right] \text{ OU } \{Q_t > Q_{15}\} \quad (15)$$

Ce test permet de cibler les dates pour lesquelles les débits montrent peu de variation dans le temps (i.e. < médiane des moyennes mobiles des variations) lorsque les débits sont faibles (i.e. < Q30) ou pour lesquelles les débits sont très faibles (< Q15).

iii) Appartenance au "moment" d'inter-crue hivernal :

$$\left\{ MM \frac{dQ}{Q} t < MM \frac{dQ}{Q} 50 \right\} \text{ ET } \{Q_{30} < Q_t < Q_{85}\} \text{ ET } \left\{ \frac{dQ}{Q} t < \frac{dQ}{Q} 75 \right\} \quad (16)$$

Ce test permet de cibler les dates pour lesquelles les débits sont > au 30^{ème} percentile et < au 85^{ème} percentile, et montrent peu de variation dans le temps.

Avec, pour les 3 tests, Q_t le débit, $\frac{dQ}{Q} t$ la valeur absolue de la variation du débit, $\frac{dQ}{Q} 75$ le 75^{ème} percentile des valeurs absolues de variations du débit, Q_{15} , Q_{30} et Q_{85} les 15^{ème}, 30^{ème} et 85^{ème}

percentiles des débits, et $MM \frac{dQ}{Q} t$ la moyenne mobile sur 5 jours glissants des valeurs absolues des variations du débit.

La Figure 11 illustre le type de séparation obtenu à l'aide de l'algorithme décrit ci-dessus.

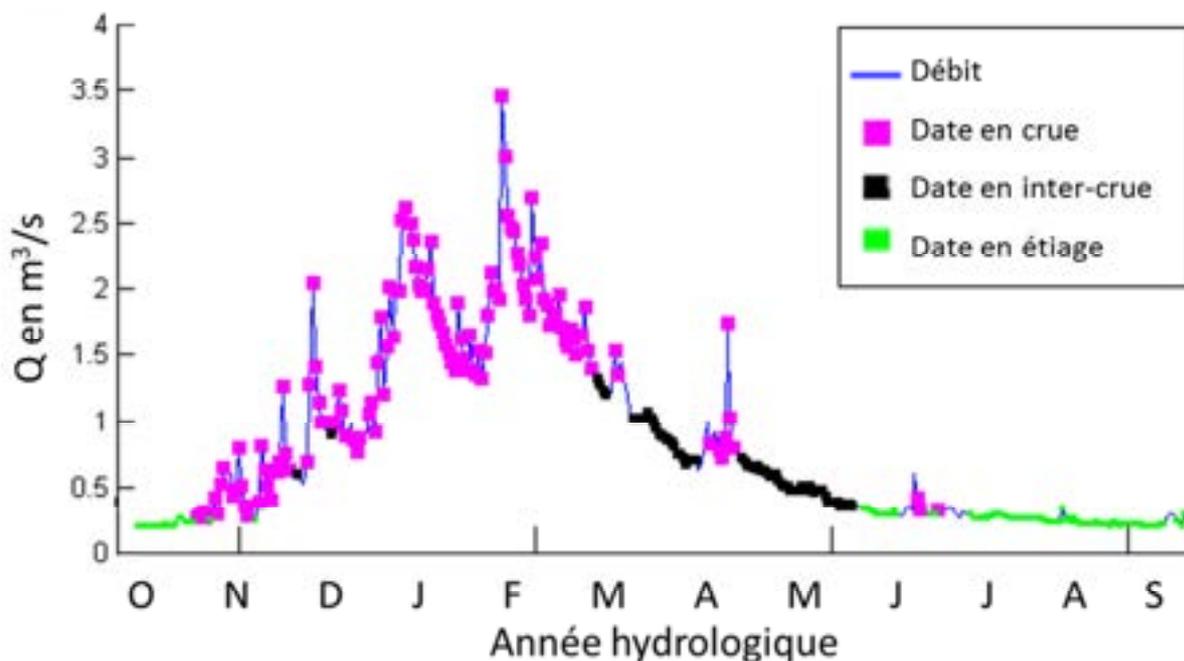


Figure 11 : Exemple de séparation des "moments" particuliers du flux en utilisant l'algorithme mis au point dans le cadre de cette étude.

APPLICATIONS AUX SERIES BASSE FREQUENCE ET MINORATION DES INCERTITUDES

L'estimation des parts attribuables aux différentes sources et formes constituant le flux total annuel de P au droit d'une station se heurte comme le calcul du flux total à la question de la fréquence des données disponibles. Les parts "flux agricole de surface" et "flux agricole de sub-surface" sont particulièrement difficiles à quantifier avec des données basse-fréquences dans la mesure où elles se constituent à des moments où le débit est fort et très fortement variable dans le temps. La fréquence au mieux mensuelle de la plupart des données rassemblées dans la BD COUPLE fait que ces parts n'ont pas pu être estimées pour les 195 stations incluses dans cette base. Seules les données du réseau ECOFLUX à la fréquence hebdomadaire auraient autorisé cette estimation. Le nombre de stations intégrées à ce réseau (13) nous est cependant apparu trop faible pour justifier ce seul calcul. Par ailleurs, le temps nous a manqué pour estimer les erreurs associées à ces différentes estimations, en fonction du nombre d'analyse disponibles par "moment" et par station, information indispensable pour une juste interprétation des résultats.

La situation est très différente pour l'estimation de la part du flux ponctuel urbain/industriel dans le flux total annuel (et par différence de celle du flux diffus agricole). En effet, étant dominant à l'étiage, période de stabilité des débits et des concentrations, ce flux n'a besoin que de quelques données pour être estimé avec une relativement bonne précision. Partant de l'hypothèse que les rejets urbains/industriels sont relativement stables sur une base annuelle, on peut ensuite propager ce flux à l'ensemble de l'année hydrologique (hypothèse de la stationnarité intra-annuelle du flux urbain/industriel). Ce flux urbain/industriel estimé à partir du flux d'étiage et sa part dans le flux total ont donc pu être estimés pour l'ensemble des stations compilées dans la BD COUPLE avec, à priori, une bonne chance que les informations déduites (i.e. parts respectives des flux urbains/industriels et agricoles dans les flux totaux) soient significatives.

Comme pour les flux totaux, le calcul des flux d'étiage s'est accompagné du calcul d'une incertitude. Celui-ci s'est effectué en utilisant l'équation suivante:

$$\text{Erreur - type} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

avec σ l'écart-type de la moyenne des flux instantanés d'étiage et n le nombre de flux instantanés appartenant au "moment" d'étiage. Afin d'augmenter la valeur de n , moyen de minorer les incertitudes, les flux d'étiage ont été calculés, comme les flux annuels totaux, en groupant 5 années hydrologiques consécutives (1987-1991 ; 1992-1996 ; 1997-2001 ; 2002-2006 ; 2007-2011).

L'ensemble des couples station P - station débit recouvrant des périodes de mesures différentes (voir annexe), il s'ensuit une hétérogénéité dans la distribution en temps des mesures du flux d'étiage, station par station. Pour tenir compte de cette hétérogénéité, 3 périodes temporelles ont été définies pour l'analyse de l'évolution dans le temps du flux d'étiage calculé pour l'ensemble des stations. Une période de 23 ans, entre 1990 et 2012 inclus, une période de 17 ans entre 1996 et 2012 inclus et une période de 13 ans entre 2000 et 2012 inclus.

De la même manière que pour le calcul des flux totaux annuels, les couples station P - station débit appartenant au réseau ECOFLUX ont subi une seconde analyse, en parallèle de l'analyse par période de 5 ans, commune à toutes les stations de la BD COUPLE. La fréquence de mesure plus élevée de ce réseau permet en effet de calculer des flux d'étiage de manière annuelle en limitant l'incertitude. Pour ces stations, les calculs de flux d'étiage ont été effectués de manière annuelle entre les années hydrologiques 1998-1999 et 2011-2012 en utilisant la même méthodologie pour isoler les périodes d'étiage et calculer les incertitudes que celle utilisée pour les traiter les périodes de 5 années hydrologiques consécutives.

Nota. Du fait de la forte variabilité interannuelle de l'hydroclimat, il est possible qu'il n'y ait pas

certaines années de données correspondant à la période d'étiage sensu-stricto, celle-ci pouvant ne pas être échantillonné par un échantillonnage ponctuel basse-fréquence (cas d'un été très humide par exemple). Dans ce cas, il est préférable de ne pas extraire de valeur du flux d'étiage pour cette année, plutôt que d'extraire une valeur dont on est certain qu'elle ne correspond pas à un flux d'étiage vrai.

2.3. OUTILS STATISTIQUES UTILISEES POUR L'ANALYSE DES TENDANCES TEMPORELLES

Des tests statistiques ont été utilisés pour évaluer le caractère significatif ou non des tendances temporelles révélées par le traitement de la BD COuPIE, et identifier des points de rupture dans les tendances. Les outils utilisés sont adaptés à des jeux de données hétérogènes comme ceux inclus dans cette base de données.

TEST DE MANN KENDALL MODIFIÉ (YUE & WANG, 2004)

Ce test reprend les hypothèses du test de Mann-Kendall (Hirsch & Slack, 1984) en modifiant celui-ci pour prendre en compte les phénomènes d'autocorrélation engendrés par la cyclicité périodique des données (cycles hydrologiques, par exemple). Il détermine si une tendance est identifiable dans une série temporelle comprenant une composante saisonnière éventuelle. Ce test à l'avantage d'être non-paramétrique, c'est-à-dire adapté à des données n'obéissant pas à une distribution particulière et pouvant contenir des données manquantes. Il est plus efficace que des tests basés sur d'autres méthodes statistiques et utilisés dans le cadre de prélèvements irréguliers (Lopez & Leynet, 2011). L'hypothèse nulle H_0 de ce test renvoie à l'absence de tendance significative. Dans le cas de l'étude, cette hypothèse est rejetée pour une probabilité inférieure à $\alpha = 5\%$, les hypothèses alternatives étant la tendance négative ou positive.

TEST DE LA PENTE DE SEN

Dans le cas d'une hypothèse de Mann-Kendall modifiée H_0 rejetée, signifiant qu'une tendance est présente au sein de la série temporelle, un second test est appliqué pour analyser cette tendance. Le test de la Pente de Sen permet d'estimer la pente de la droite de régression correspondant le mieux à cette tendance (Fig. 12). Elle est calculée comme la médiane de toutes les pentes entre chaque paire de données et permet de donner peu d'importance aux valeurs exceptionnelles ou incohérentes. Dans le cadre des séries de flux correspondant à des "moments" déterminés par l'algorithme présenté ci-dessus (cas des flux d'étiage), si quelques dates incluses dans les séries ne correspondent pas réellement à ces "moments" hydrologiques définis, conduisant à des valeurs de

flux incohérente pour ce "moment", le test attribuera très peu d'importance à ces valeurs. Le test fourni également un intervalle de confiance à 95% pour la valeur de la pente comme le montre la Figure 12.

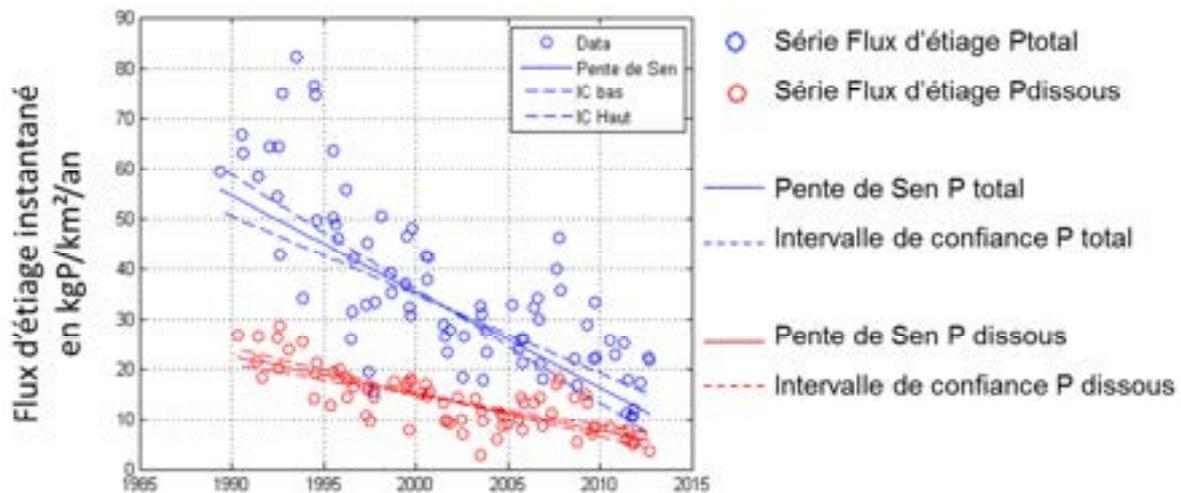


Figure 12 : Exemple d'utilisation du test de Sen sur les séries Flux d'étiage de P_{tot} et de P_{dissous} d'un couple station phosphore – station débit de la BD COUPLE.

ANALYSE DE COVARIANCE

Les tendances observables dans les séries de flux peuvent avoir des origines diverses mais il est nécessaire, avant toute analyse, de connaître l'évolution du débit pendant la même période pour déterminer la part de la tendance pouvant être liée à la variation du flux d'eau. Dans cette étude, des analyses de covariance ont été systématiquement réalisées pour déterminer le pourcentage de variance des flux de P pouvant être imputable à des changements dans les flux d'eau.

TEST D'HOMOGENÉITÉ DE PETTITT (PETTITT, 1979)

Ce test permet d'identifier le moment au cours duquel se produit une rupture dans la distribution des données. Il est également non-paramétrique. Ce test n'a pas été utilisé systématiquement dans cette étude, mais restreint à l'analyse de quelques stations en particulier. Ce test est à rapprocher, dans sa construction, du test de Mann-Kendall, bien qu'il soit spécifiquement dédié à la détection d'une rupture, plutôt qu'à la détection d'une tendance régulière (Lopez et Leynet, 2011).

3. RESULTATS

Cette partie présente les éclairages qu'apporte le traitement de la base de données COUPIE sur la variabilité spatiale et temporelle des flux de P_{dis} et P_{tot} émis par les bassins versants bretons, sur les relations débit-concentration caractéristiques des rivières bretonnes, ainsi que sur l'évolution dans le temps et dans l'espace de la part des sources diffuses agricole et ponctuelles urbaine/industrielles dans la pollution de ces rivières par le P. On notera que le calcul des flux de P_{dis} et de P_{tot} par période de 5 années hydrologiques consécutives n'a, au final, pas été appliqué sur la période 1987-1991, cette période combinant le désavantage de ne disposer que d'un nombre limité de stations et de rassembler beaucoup de données de qualité médiocre. On notera également que les résultats exhaustifs chiffrés obtenus station par station sont disponibles dans les tableaux figurant en annexe. Tous les flux présentés ci-après sont exprimés un flux spécifique ($Kg/Km^2/an$) pour autoriser des comparaisons entre bassins.

3.1. EFFET DU CHOIX DE LA METHODE ET DE LA PERIODE DE CALCUL SUR LA VALEUR DU FLUX ET SUR L'ESTIMATION DE L'INCERTITUDE ASSOCIE

Avant d'entrée dans le détail des résultats obtenus, il est important d'analyser en quoi la méthode de calcul choisie impacte le flux et son incertitude, ainsi que l'effet de la longueur de la période de temps retenue sur les valeurs des flux calculés.

EFFET DU CHOIX DE LA METHODE DE CALCUL

Les deux méthodes testées dans cette étude pour le calcul du flux (méthodes SRC et DWC) donnent des résultats quasi identiques, les différences étant <5%, tant pour les flux de P_{dis} que de P_{tot} (Fig. 13). Dans le détail, la méthode SRC sous-estime les flux par rapport à la méthode DWC, d'environ 5% en moyenne pour les flux de P_{dis} (-4,99% ; n = 125), et d'environ 1 % en moyenne pour les flux de P_{tot} (-1,03% ; n = 197). La situation est très différente concernant les incertitudes. Là, les écarts sont très importants suivant la méthode utilisée, les incertitudes calculées en lien avec la méthode DWC étant systématiquement beaucoup plus faibles que celles calculées avec la méthode SRC, les différences étant d'un facteur 9 et 4, respectivement, pour les incertitudes inférieures et supérieures, concernant les flux de P_{dis} , et d'un facteur 13 et 5, respectivement, pour les incertitudes inférieures et supérieures concernant les flux de P_{tot} . Ces différences s'expliquent très probablement par la grande différence des procédures de calcul utilisées. Dans le cas de la méthode DWC, l'incertitude est en effet évaluée à partir des valeurs prises par les variables $W_{2\%}$, $M_{2\%}$, et $b50_{sup}$, ces variables renvoyant à des abaques d'incertitude établies à partir de cours d'eau de référence

hydrodynamiquement comparables aux cours d'eau analysés. Dans le cas de la méthode SLRC, l'incertitude est calculée directement à partir de la régression C-Q de la station considérée. Généralement, le R^2 de cette relation est très éloigné de 1 pour les débits supérieurs aux débits médians, du fait de la basse-fréquence des séries de données considérées ici et de la rareté des évènements de crue (d'où la mauvaise détermination de la régression C-Q pour les forts débits). Couplé au fait qu'une grande part du flux passe quand les débits sont supérieurs au débit médian, cela explique que l'incertitude calculée par la méthode SRC soit très élevée. Bien que l'incertitude calculée en lien avec la méthode DWC repose sur des abaques, celle-ci prend directement en compte l'amplitude et la variabilité des concentrations propre à chaque station (i.e. les deux facteurs générateurs d'incertitude) au travers des variables $W_{2\%}$ et $b_{50_{sup}}$, ces deux variables rentrant directement dans le calcul de la variable $M_{2\%}$ elle-même utilisée pour extraire l'incertitude à partir des abaques de référence.

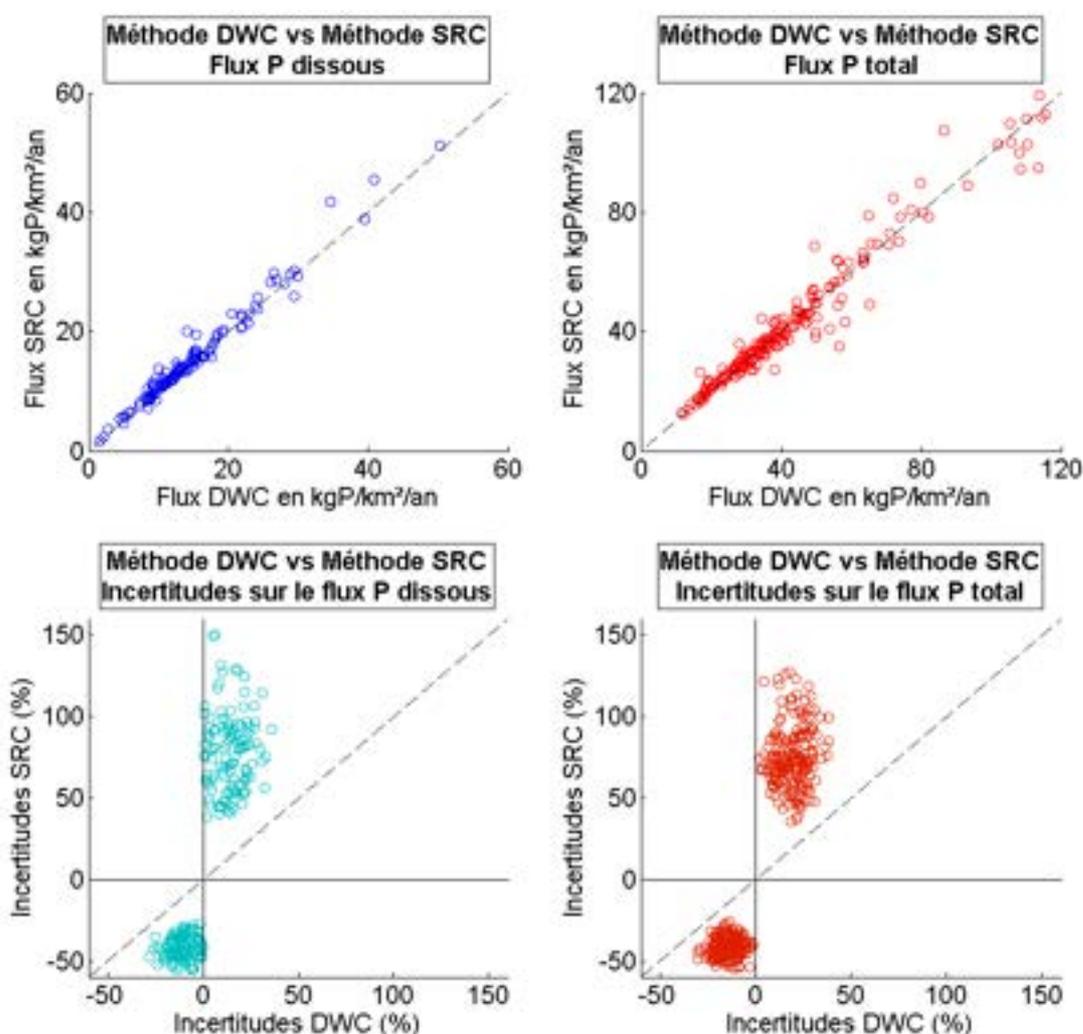


Figure 13 : Effet du choix de la méthode de calcul du flux sur la valeur du flux et son incertitude. Les données reportées se rapportent aux flux et incertitudes calculées pour les périodes 2002-2006 et 2007-2011. Les droites 1:1 en pointillés correspondent au lieu d'identité des flux et des incertitudes.

On peut penser que la référence faite à des rivières de même réactivité hydrologique et disposant de suivis haute-fréquences des concentrations en P, référence qui est le propre de la méthode des abaques, constitue une méthode plus robuste pour le calcul de l'incertitude sur les flux que la méthode associée à la méthode SRC de calcul du flux, cette méthode des abaques ne souffrant pas du biais amplificateur que constitue la mauvaise qualité de la régression C-Q. Sur la base de cet argument, ce sont donc les incertitudes issues de la méthode des abaques qui seront utilisées dans la suite de ce rapport.

EFFET DU CHOIX DE LA PERIODE DE CALCUL

Afin de minorer les incertitudes sur les flux, nous avons pris le parti dans cette étude de calculer les flux par périodes de 5 années hydrologiques consécutives. Les données issues des stations du réseau ECOFLUX fournissent un moyen d'évaluer le gain d'incertitude généré par l'extension de la durée de calcul de 1 à 5 années hydrologiques, la fréquence hebdomadaire de mesure disponible pour ce réseau autorisant le calcul de flux annuel relativement précis. La Figure 14 illustre le résultat de ce test, en comparant pour chaque station les incertitudes sur les flux calculés pour des périodes de 1 et 5 années hydrologiques, respectivement. Le résultat est une division par 2 en moyenne des incertitudes, quand la période de calcul est élargie de 1 à 5 années hydrologiques. Ce test valide le choix qui a été fait dans cette étude de comparer les flux période de 5 années hydrologiques, par périodes de 5 années hydrologiques.

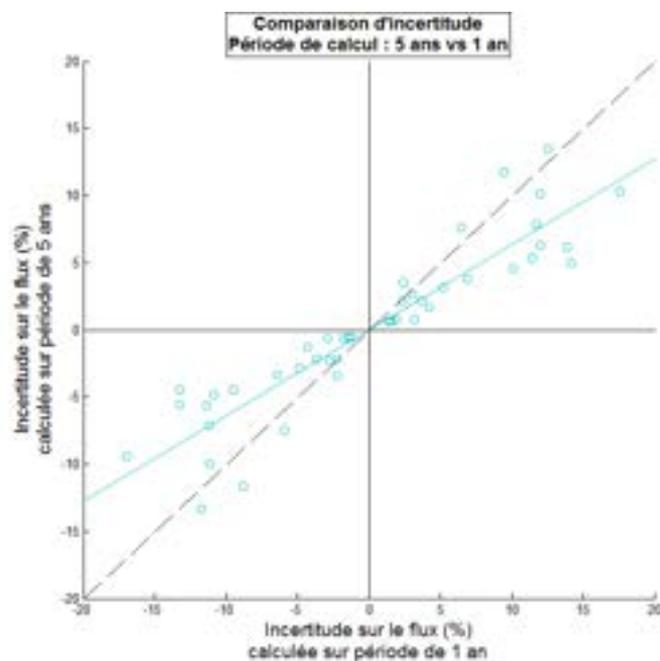


Figure 14 : Comparaison des incertitudes estimées sur les flux calculées pour les stations du réseau ECOFLUX, suivant que ces flux sont calculés sur une base annuelle ou sur la base de 5 années hydrologiques consécutives. Une réduction d'un facteur 2 environ des incertitudes est observée si la période de calcul du flux est allongée de 1 à 5 ans.

3.2. BILAN DES INCERTITUDES SUR LES FLUX ANNUELS ET LES FLUX D'ETIAGE

3.2.1. INCERTITUDES SUR LES FLUX ANNUELS

Nous avons analysé la répartition des incertitudes associées aux flux spécifiques annuels de P_{dis} et de P_{tot} , calculées pour l'ensemble des stations contenues dans la BD COuPIE. Les résultats de cette analyse sont récapitulés dans le Tableau 3. La moyenne des incertitudes inférieures et supérieures s'établit respectivement à -11,8 et +14,2% pour les flux de P_{dis} , et à -16,0 et +19,4% pour les flux de P_{tot} . Les incertitudes maximales, supérieures et inférieures, sont plus élevées oscillant entre -34,8 et +36,3 % pour les flux de P_{dis} et entre -30,0 et +50,1% pour les flux de P_{tot} . Ceci ne doit pas cacher que 75% des incertitudes sont de l'ordre de, ou seulement légèrement supérieures aux incertitudes moyennes, étant comprises entre -16,5 et +20,2 % et entre -20,5 et +24,8%, pour les flux de P_{dis} et de P_{tot} , respectivement.

		P_{dissous}	P_{total}
		%	%
Incertitude supérieure	Max	36,3	50,1
	75^{ème} percentile	20,2	24,8
	Médiane	14,0	19,8
	Moyenne	14,2	19,4
	Min	0,6	2,0
Nombre de flux annuels calculés		210	288
Incertitude inférieure	Min	-0,6	-1,3
	Moyenne	-11,8	-16,0
	Médiane	-10,8	-15,8
	75^{ème} percentile	-16,5	-20,5
	Max	-34,8	-30,0

Tableau 3 : Récapitulatif des incertitudes associées aux flux annuels de P_{diss} et de P_{tot} , calculés par périodes de 5 années hydrologiques consécutives de 1992 à 2011.

La Figure 15 montre qu'il n'existe pas de corrélation entre l'incertitude exprimée en pourcentage du flux et la valeur du flux, alors que des corrélations apparaissent logiquement lorsque l'incertitude est exprimée en unité de flux.

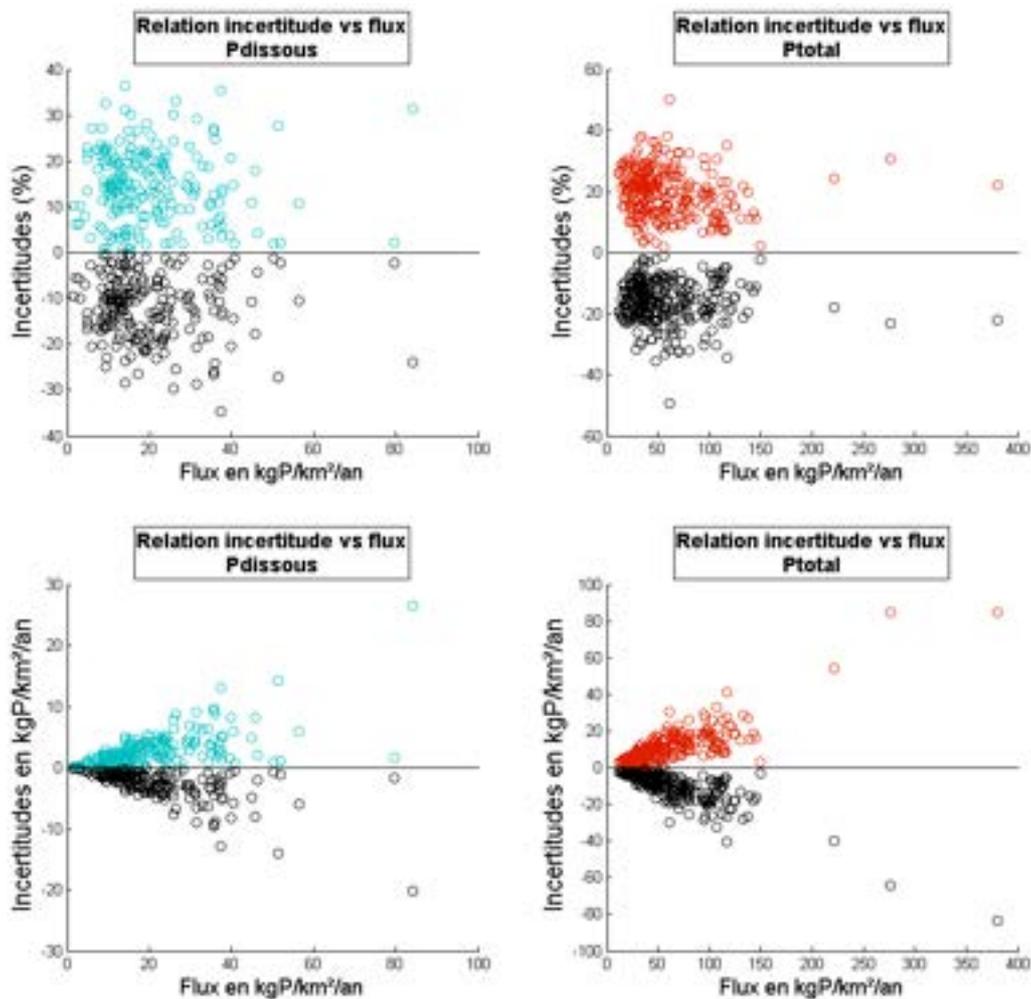


Figure 15 : Relations entre incertitudes sur les flux et valeurs absolues des flux.

Comme expliqué plus haut, l'incertitude sur les flux calculés dépend non seulement de la fréquence d'échantillonnage mais surtout des caractéristiques hydrologiques du cours d'eau, et notamment de sa plus ou moins grande réactivité exprimée par le facteur $W_{2\%}$. C'est en effet la valeur prise par ce facteur qui conditionne l'existence dans les séries temporelles d'évènements rares extrêmes, cause première de l'incertitude sur le flux pour des séries basse-fréquences comme celes présentes dans la BD COUPIE. La Figure 16 inventorie l'effet sur l'incertitude de la fréquence d'échantillonnage et de la valeur prise par ce facteur $W_{2\%}$. La figure montre clairement une diminution des incertitudes maximales et minimales sur les flux avec l'accroissement de la fréquence d'échantillonnage, ces mêmes incertitudes augmentant à l'inverse avec l'accroissement de la valeur

du $W_{2\%}$, et notamment lorsque ce paramètre franchit le seuil des 12-15%, limite au-delà de laquelle les incertitudes sur le flux divergent vers des valeurs élevées.

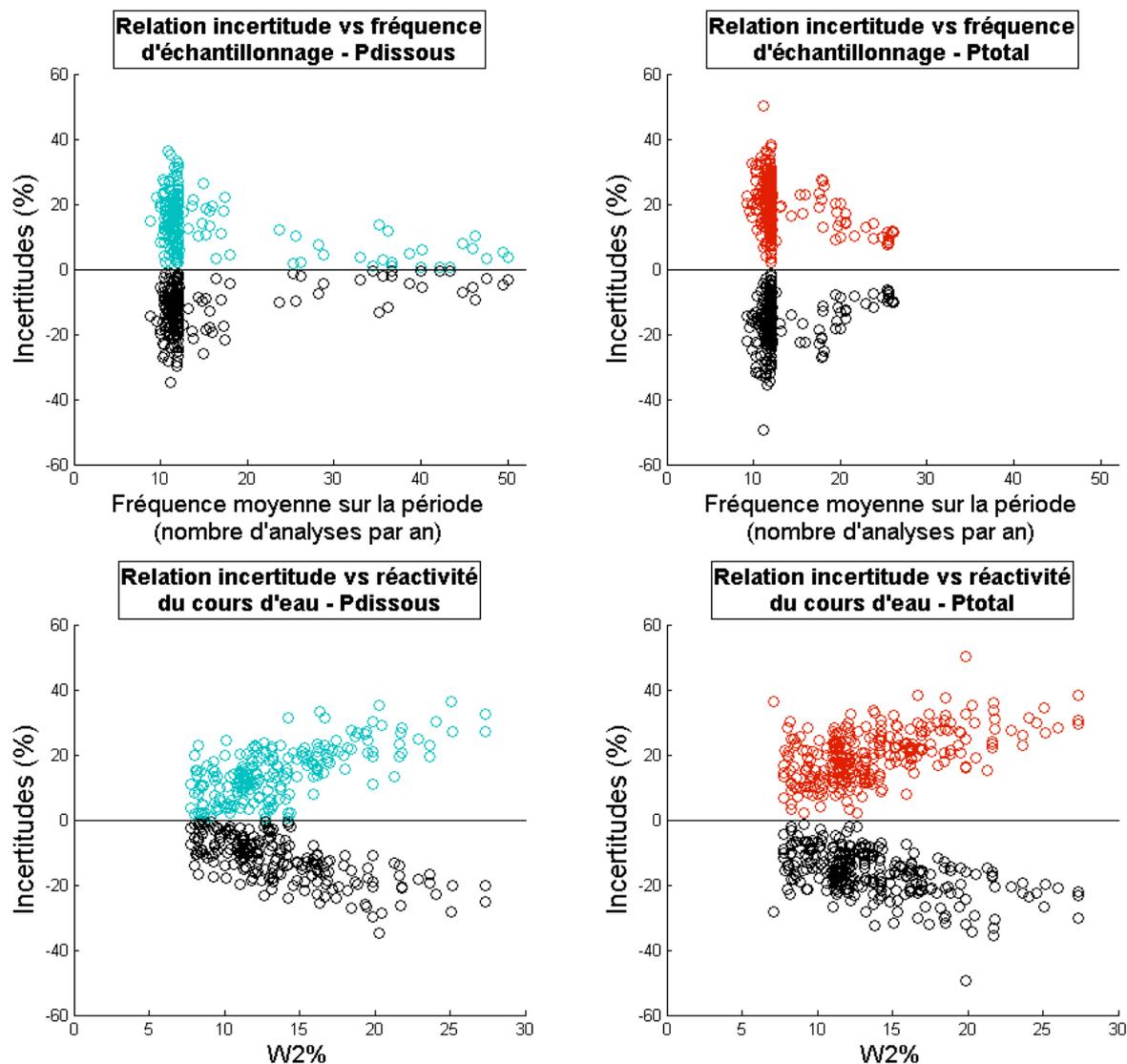


Figure 6 : Evolution des incertitudes maximales et minimales sur les flux annuels de P_{diss} et de P_{tot} calculés dans cette étude en fonction de la fréquence d'échantillonnage et de la réactivité hydrologique du cours d'eau exprimée par le facteur $W_{2\%}$.

3.2.2. INCERTITUDES SUR LES FLUX D'ÉTIAGE

Les incertitudes sur les flux d'étiage de P_{dis} et de P_{tot} calculées selon la méthode définie plus haut sont récapitulées dans le Tableau 4. La moyenne des incertitudes calculées sur l'ensemble des flux d'étiage est de $\pm 15,8\%$ pour les flux de P_{dis} et de $\pm 15,4\%$ pour les flux de P_{tot} . Les incertitudes peuvent atteindre des valeurs très élevée dans certains cas isolés où les flux ne sont définis que par quelques points de mesure (maximum à $\pm 71,3$ et $\pm 83,7\%$ pour les flux d'étiage de P_{dis} et de P_{tot}

respectivement) mais dans 75% des cas, ces incertitudes restent $< \pm 20\%$ ($< \pm 19,0$ et $\pm 18,4\%$ pour les flux d'étiage de P_{dis} et de P_{tot} respectivement).

	P_{dissous}	P_{total}
	%	%
Max	71,3	83,7
75^{ème} percentile	19,0	18,4
Médiane	13,9	12,9
Moyenne	15,8	15,4
Min	3,8	4,1
Nombre de flux d'étiage calculés	310	374

Tableau 4 : Récapitulatif des incertitudes associées aux flux d'étiage de P_{diss} et de P_{tot} calculés par périodes de 5 années hydrologiques consécutives de 1992 à 2011.

Il existe clairement une relation entre le nombre de dates au cours desquelles l'étiage est échantillonné au niveau d'une station et l'incertitude sur le flux d'étiage, ce qui est logique puisque l'incertitude sur le flux est calculée à partir de l'écart-type de la moyenne des valeurs des flux d'étiage instantané divisée par la racine carrée du nombre de valeurs (dates d'échantillonnage de l'étiage) entrant dans le calcul de cette moyenne. Cette relation est illustrée dans la Figure 17 où l'on voit que l'incertitude sur le flux d'étiage décroît avec l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage de la période d'étiage. La figure montre qu'à partir de 4 échantillonnages par an en moyenne de la période d'étiage, l'incertitude sur les flux d'étiage de P_{dis} et de P_{tot} devient systématiquement $< \pm 15\%$. Evidemment, cette fréquence d'échantillonnage va dépendre à la fois de la durée de l'étiage (i.e. un étiage prolongé va augmenter les chances de réaliser un prélèvement pendant cette période) et à la fois de la fréquence du suivi (i.e. un suivi à fréquence élevée favorisera un nombre plus important d'échantillonnage à durée d'étiage égale). La Figure 17 montre que pour obtenir 4 échantillonnages par an en moyenne de la période d'étiage, la fréquence annuelle d'échantillonnage doit être au minimum de l'ordre de 15 échantillons par an, dans l'hypothèse d'un échantillonnage à dates fixes.

Pour confirmer ce rôle de la fréquence d'échantillonnage de la période d'étiage sur l'incertitude du flux d'étiage, un travail spécifique a été conduit sur les stations bénéficiant des séries de mesure les plus denses, à savoir les stations des réseaux ECOFLUX (environ 41 mesures/an en moyenne) et SISE-EAUX des côtes d'Armor (environ 23 mesures/an en moyenne). Les incertitudes estimées sur les flux d'étiage de P_{dis} calculés pour les stations de ces deux réseaux sont en moyenne de 8,5 (ECOFLEX) et 9,4% (SISE-EAUX), respectivement. Ces incertitudes sont inférieures de moitié à la moyenne des

incertitudes calculées pour l'ensemble des stations de la BD COUPLE, dont la fréquence d'échantillonnage s'établit à 12 mesures/an en moyenne. Des résultats du même type sont obtenus si l'on dégrade des séries de mesures journalières de la concentration en P acquises en 2008 par le CNRS sur les rivières Néal et Rance dans les Côtes d'Armor. Si ces séries sont dégradées à la fréquence d'un échantillon par semaine et que l'on compare les flux d'étiage calculés à cette fréquence avec les vrais flux obtenus à partir des séries haute-fréquences journalières, on arrive aux mêmes incertitudes estimées sur les flux d'étiages déterminés à partir des séries dégradées (52 mesures/an) que pour les stations du réseau ECOFLUX (41 mesures/an), à savoir des incertitudes comprises entre +12% et -10% (voir aussi la Fig. 18).

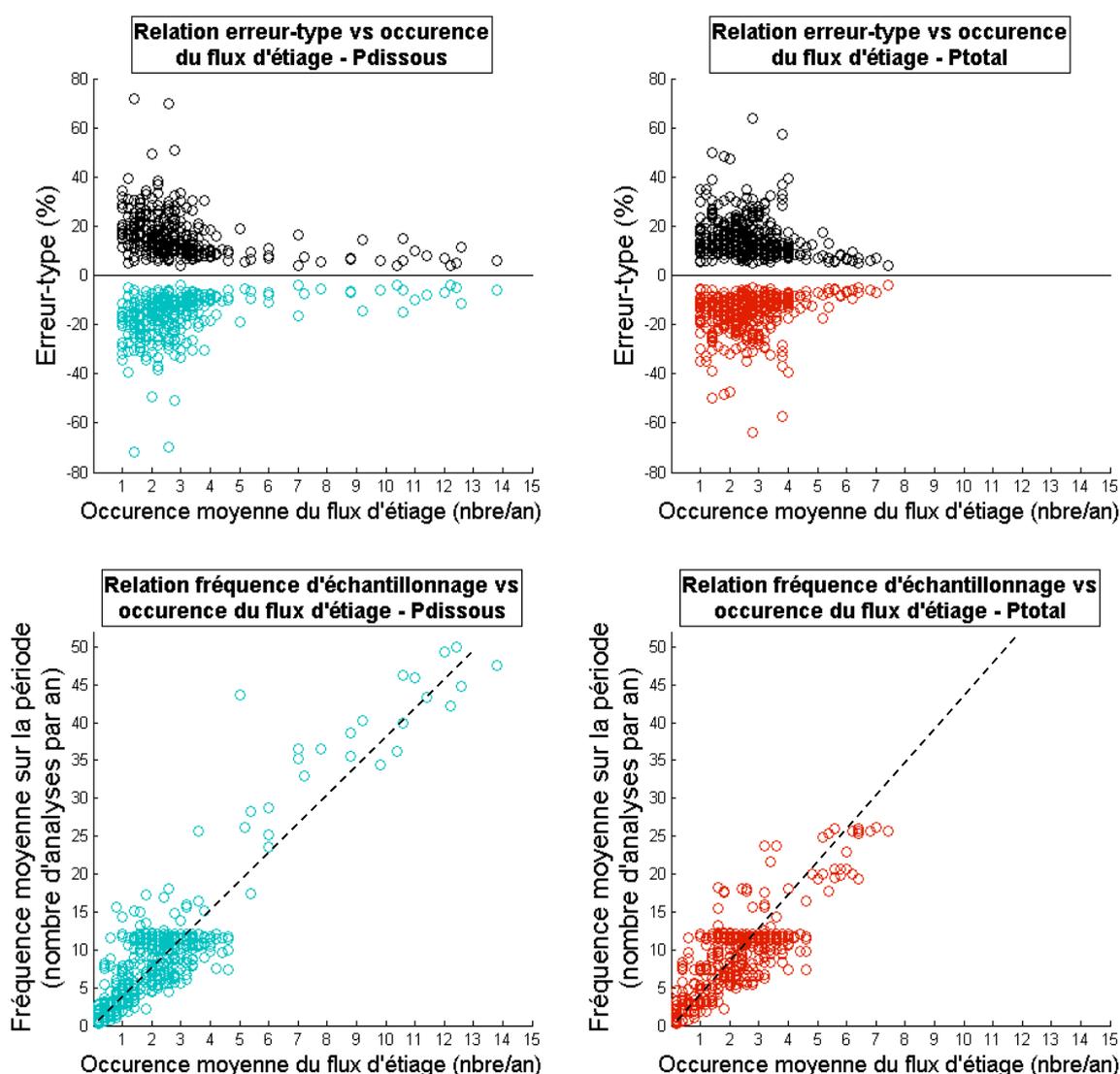


Figure 17 : Relations entre incertitudes sur les flux d'étiage et fréquence d'échantillonnage de la période d'étiage. Les figures du bas montrent qu'une fréquence de 15 échantillon minimum par an (échantillonnage à date fixe) est requise pour intercepter chaque année au moins 4 dates correspondant à la période d'étiage, nombre nécessaire pour abaisser l'incertitude sur le flux d'étiage à $\pm 15\%$.

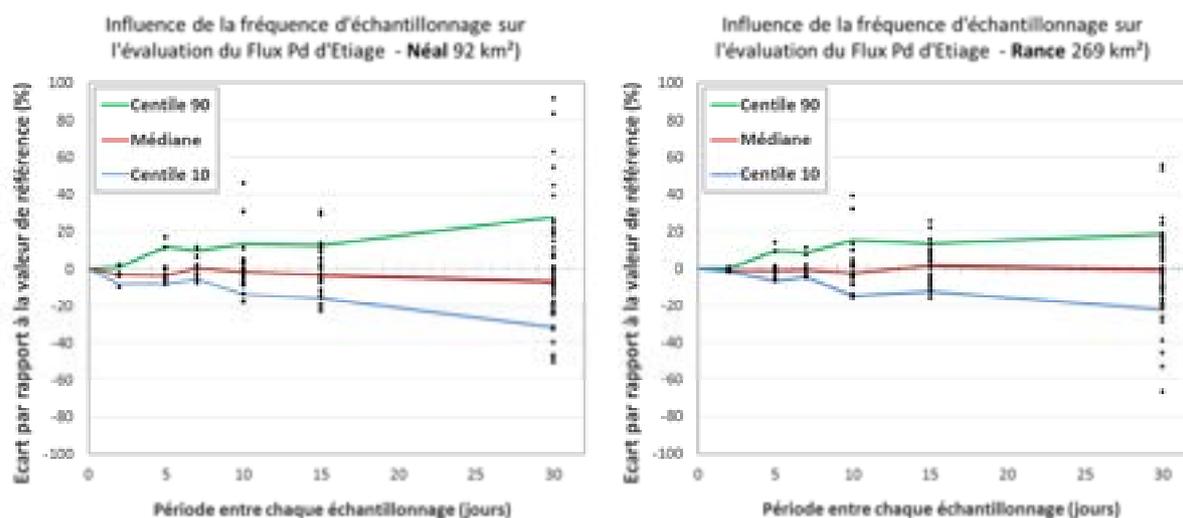


Figure 18 : Evolution de l'incertitude sur le flux d'étiage en P_{dis} en fonction de la fréquence d'échantillonnage, telle que déterminée pour les rivières Néal et Rance (22) disposant d'une année de suivis des teneurs en P_{dis} . Les deux graphes montrent qu'un abaissement de la fréquence à 1 échantillon par semaine permet d'abaisser l'incertitude à $\pm 10\%$.

3.3. COUVERTURE SPATIO-TEMPORELLE DE LA BD COUPLE

Les bassins versants drainés par les 195 stations P incluses dans la BD COuPIE représentent 73% de la superficie totale de la Bretagne. Ce chiffre constitue un maximum sachant que toutes les stations ne sont pas actives en même temps. Le Tableau 5 répertorie les nombres de stations actives par ensemble de 5 années hydrologiques consécutives, ainsi que la part du territoire de la Bretagne échantillonné par chacun de ces ensembles. Le tableau montre que seulement 19 stations étaient actives en 1992-1996, contre 103 en 2007-2011. Malgré l'augmentation très importante du nombre des stations, on constate que la surface cumulée des aires drainées en amont n'a que peu évolué sur la même période passant de 53 à 57% pour le P_{tot} . Ceci traduit le fait que les stations installées initialement l'ont été à l'exutoire de grands bassins, les stations installées ensuite étant pour la plupart installées plus à l'amont, à l'exutoire de sous-bassins internes à ces grands bassins initiaux. Ainsi, une densification spatiale des suivis s'est opérée à l'échelle de la Bretagne entre 1987 et l'actuel, densification permettant une approche par bassin versant élémentaire des sources de la contamination par le P.

D'un point de vue plus spécifiquement temporel, l'examen du Tableau 5 montre que très peu de stations (9 sur un total de 195) permette de calculer des flux en continu entre 1987 et 2012, et que

seulement 127 stations sur 195 satisfont au critère minimal de 4 années consécutives au moins, requis pour rentrer dans le groupe des stations utilisées pour l'estimation des flux. Concernant la qualité du couplage station P – station débit, le Tableau 5 montre que 71 stations (36% du total) relève de la qualité maximale A1 (très bonne qualité), assurant une couverture spatiale égale à 65 et 59% du territoire de la Bretagne dépendant que l'on considère respectivement le P_{tot} ou le P_{dis} . Dernier point important issu du Tableau 5 : la diminution régulière depuis 2001 des stations assurant la mesure du P_{dis} , ce paramètre étant de plus en plus remplacé par la mesure unique du P_{tot} .

	P_{tot}		P_{dis}	
	Nombre de stations	Superficie cumulée BV (% Bretagne)	Nombre de stations	Superficie cumulée BV (% Bretagne)
1987-1991	12			
1992-1996	19	53%	19	53%
1997-2001	60	50%	54	51%
2002-2006	82	52%	69	45%
2007-2011	103	57%	47	42%
Nbre de stations ayant fonctionné en continu sur la période	9	22%	6	8%
Nbre de stations cumulant au moins 4 années consécutives de suivi sur la période	127	70%	88	68%
Nbre de stations classées A1	73	65%	50	59%

Tableau 5 : Couverture spatiale et temporelle des stations P intégrées à la BD COuPIE.

3.4. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS, DE L'HYDRAULICITE ET DES FLUX SUR LA PERIODE 1987-2011

3.4.1. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS

L'évolution globale des concentrations sur la période investiguée a été analysée en calculant les concentrations médianes, station par station, et par séries de 5 années hydrologiques consécutives (1987-1991 ; 1992-1996 ; 1997-2001 ; 2002-2006 ; 2007-2011). Deux tendances sont relevées (Figs. 19 et 20): i) une tendance globale à la diminution dans le temps des concentrations marquée par la diminution générale des médianes; cette diminution générale des concentrations dans le temps est illustrée par la diminution de la médiane des médianes, tant pour la P_{dis} que pour le P_{tot} ; ii) un tendance aussi globale à un resserrement de la variabilité des concentrations dans le temps, avec en particulier une diminution très sensible des maxima de concentration.

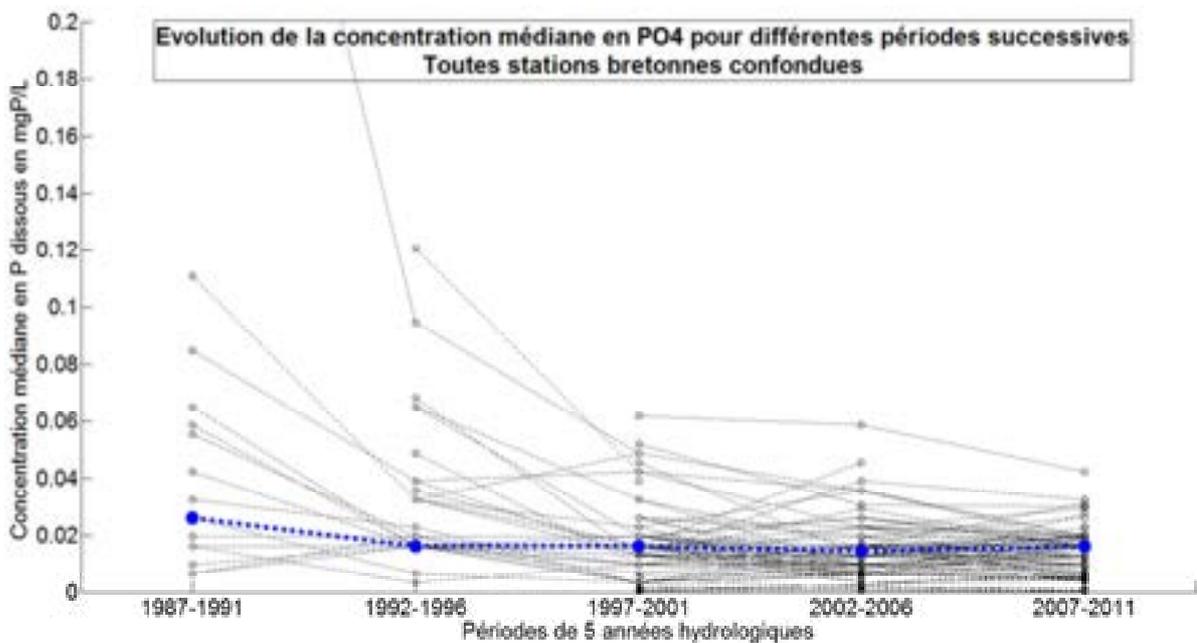


Figure 19 : Evolution de la médiane des concentrations en P_{dis} depuis 1987, station par station. Les valeurs correspondant à une même station sont reliées entre elles. La courbe en pointillés bleu épais figure l'évolution de la médiane des médianes sur la période.

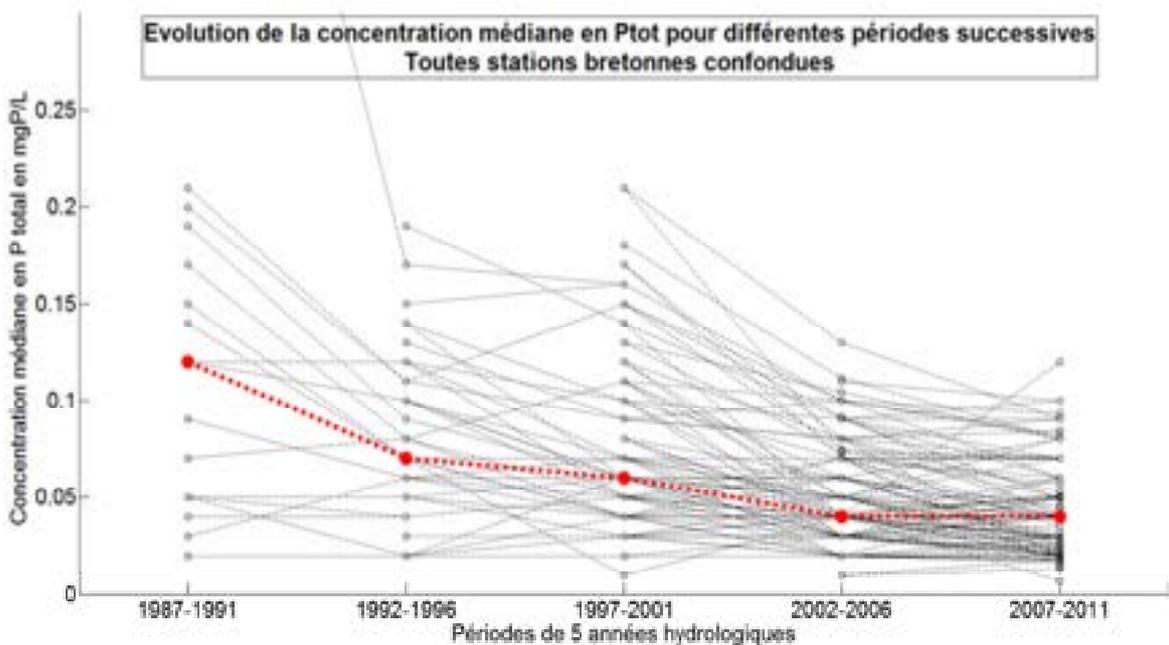


Figure 20 : Evolution de la médiane des concentrations en P_{tot} depuis 1987, station par station. Les valeurs correspondant à une même station sont reliées entre elles. La courbe en pointillés rouge épais figure l'évolution de la médiane des médianes sur la période.

3.4.2. EVOLUTION DE L'HYDRAULICITE

Si la période investiguée a été marquée par de fortes variations interannuelles des débits avec une alternance d'années très humides comme 1994-1995 et 2000-2001 et très sèches comme 2004-2005, le point remarquable est la constance dans le temps des valeurs d'hydraulicité périodes de cinq ans par périodes de cinq ans, avec des variations inter-périodes très faibles, $<\pm 5\%$ (Fig. 21). Par ailleurs aucune tendance à la hausse ni à la baisse n'est détectée sur la période. D'ores et déjà, on peut conclure que la diminution observée des concentrations en P sur la période 1997-2012 constatée au niveau des stations de Bretagne n'est pas le fait d'une augmentation des débits sur la même période. Clairement, d'autres facteurs de causalité sont à rechercher.

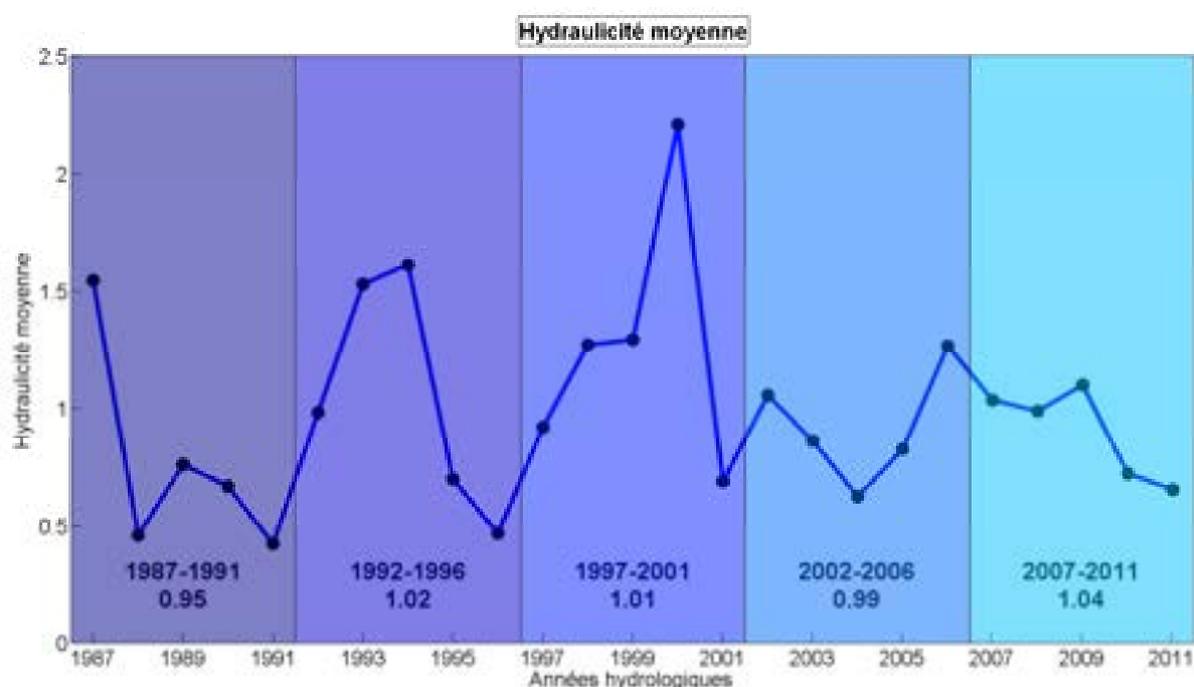


Figure 21 : Evolution moyenne de l'hydraulicité des rivières échantillonnées par les stations P de la BD COuPIE entre 1987 et 2012.

3.4.3. EVOLUTION ET DISTRIBUTION SPATIALE DES FLUX GLOBAUX

Faute d'un nombre de stations suffisantes pour la période 1987-1991 et du fait de données de qualité généralement médiocre durant cette période, les flux n'ont été calculés qu'à partir des années 1992-1996. En cohérence avec la diminution des concentrations et la stationarité de l'hydraulicité, les flux annuels de P_{dis} et de P_{tot} présentent une tendance globale à la baisse, notamment depuis les années 1997-2001 (voir Figs. 22 et 23).

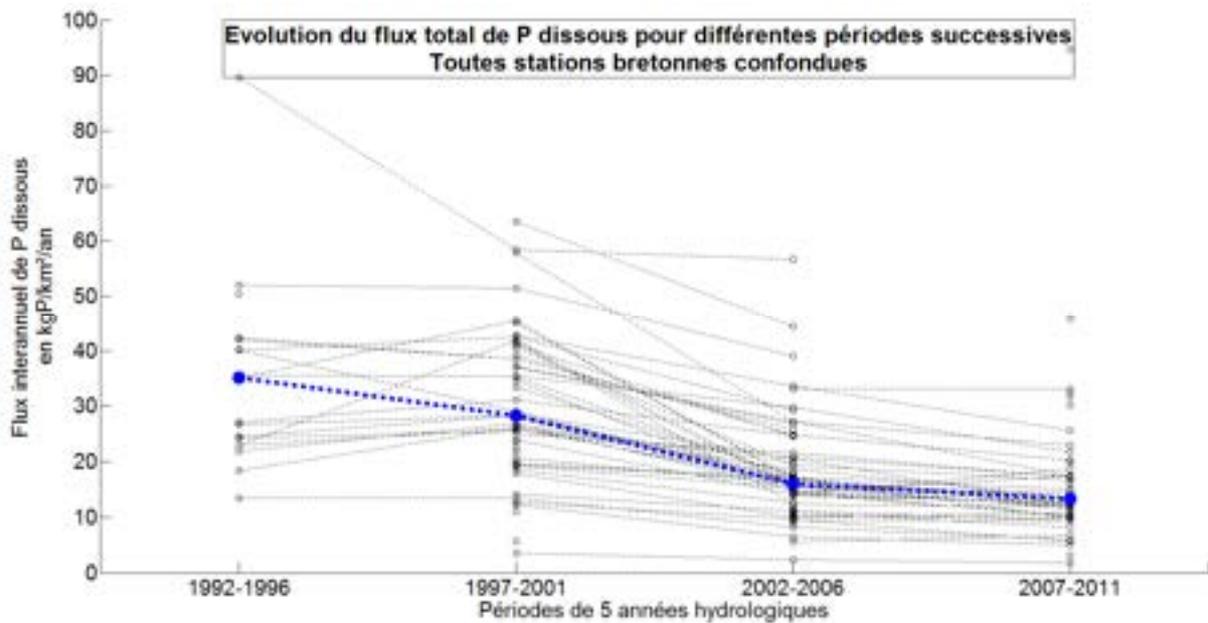


Figure 22 : Evolution des flux de P_{dis} transportés annuellement par les rivières de Bretagne depuis 1992. Les flux sont calculés par périodes de 5 années hydrologiques consécutives. Les valeurs correspondant à une même station sont reliées entre elles. La courbe en tirets pointillés bleu épais décrit la médiane des moyennes sur la période.

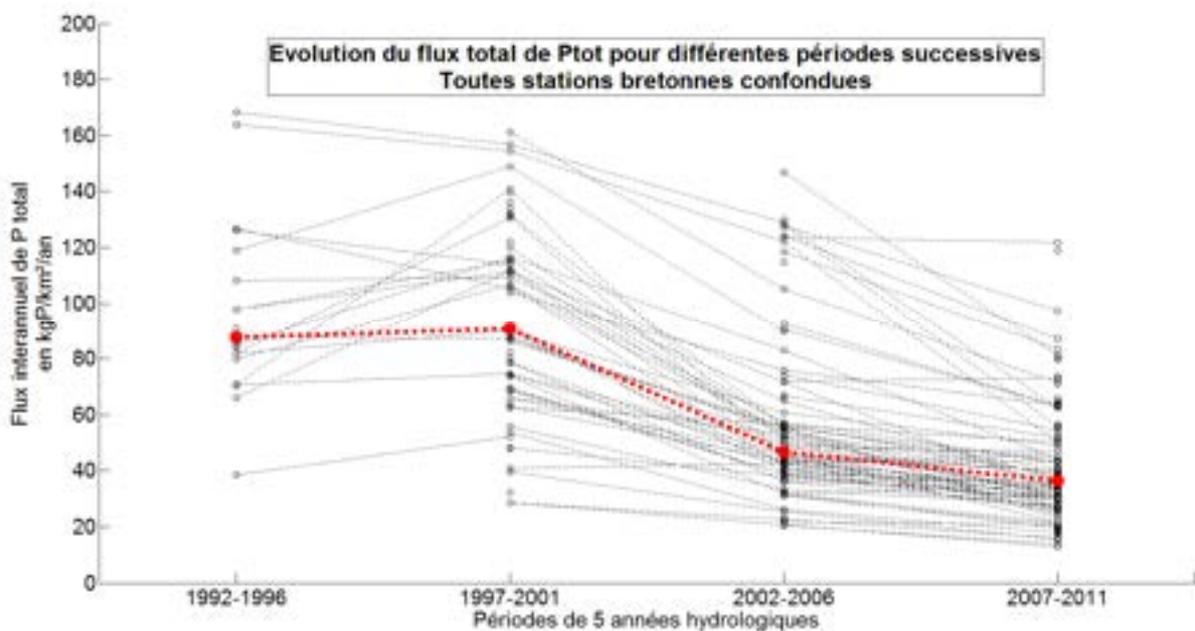


Figure 23 : Evolution des flux de P_{tot} transportés annuellement par les rivières de Bretagne depuis 1992. Les flux sont calculés par périodes de 5 années hydrologiques consécutives. La courbe en tirets pointillés rouge gras décrit la médiane des moyennes sur la période.

Les Tableaux 6 et 7 présentent une analyse quantitative de cette évolution. On constate que la diminution du flux de P_{tot} a été en moyenne d'un facteur 2.7 pour le P_{dis} depuis 1992 avec un flux moyen en P_{dis} passant de 31.3 à 13.1 Kg/km²/an, et d'un facteur 2.3 pour le P_{tot} avec un flux moyen de P_{tot} passant de 86.3 à 37.5 Kg/km²/an, toutes stations confondues. Ces deux mêmes tableaux

montrent, que les valeurs bornant ces diminutions ne changent pas de manière significative si le calcul est restreint aux seules stations bénéficiant d'un couplage station P – stations débit de qualité A1. Ce résultat montre que la qualité du couplage station P – station débit n'a pas véritablement d'impact sur les résultats, démontrant en retour que les hypothèses faites lors de ces couplages (homogénéité des flux spécifique d'eau) sont globalement valides.

		Flux P_{dissous} annuel moyen			
		1992-1996	1997-2001	2002-2006	2007-2011
		<i>kgP/km²/an</i>	<i>kgP/km²/an</i>	<i>kgP/km²/an</i>	<i>kgP/km²/an</i>
Toutes stations	Min	12,0	3,1	2,1	1,6
	Max	79,7	56,5	50,4	40,8
	Médiane	31,2	25,2	14,2	11,4
	Moyenne	31,3	27,3	15,6	13,2
	Nombre Couples	19	54	69	47
	Facteur Max/Min	7	18	24	25
Stations classée A1	Min	16,3	5,0	7,9	2,9
	Max	79,7	52,0	50,4	28,1
	Médiane	31,2	26,5	14,2	12,0
	Moyenne	32,6	27,9	16,5	13,5
	Nombre Couples	15	30	37	25
	Facteur Max/Min	5	10	6	10

Tableau 6 : Distribution des valeurs de flux de P_{dis} (max ; min ; moyenne ; médiane ; rapport max/min) issues de la BD COuPIE, pour la période 1992-2012.

		Flux P_{tot} annuel moyen			
		1992-1996	1997-2001	2002-2006	2007-2011
		<i>kgP/km²/an</i>	<i>kgP/km²/an</i>	<i>kgP/km²/an</i>	<i>kgP/km²/an</i>
Toutes stations	Min	34,2	25,3	18,2	11,5
	Max	149,5	380,5	221,3	108,2
	Médiane	77,9	86,8	41,9	32,8
	Moyenne	86,3	89,7	53,0	37,5
	Nombre Couples	19	60	82	103
	Facteur Max/Min	4	15	12	9
Stations classée A1	Min	58,6	35,2	22,7	13,7
	Max	149,5	380,5	221,3	108,2
	Médiane	80,8	97,7	47,5	34,1
	Moyenne	89,5	99,7	59,0	38,6
	Nombre Couples	15	34	41	61
	Facteur Max/Min	3	11	10	8

Tableau 7 : Distribution des valeurs de flux de P_{tot} (max ; min ; moyenne ; médiane ; rapport max/min) issues de la BD COuPIE, pour la période 1992-2012.

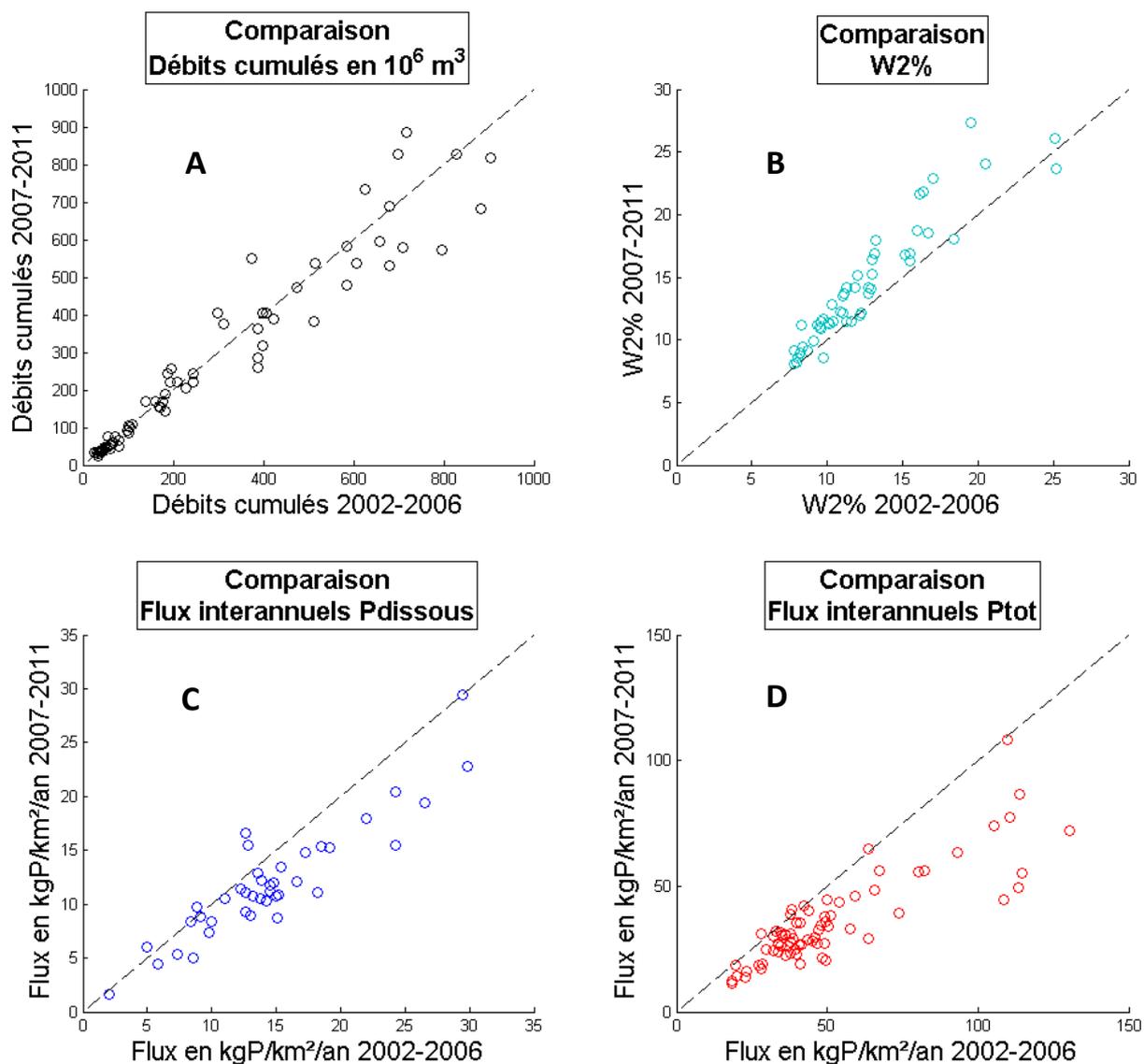


Figure 24 : Evolution des flux d'eau, de P_{dis} et de P_{tot} pour les stations de la BD COuPIE entre 2002 et 2012.

L'augmentation du nombre de stations à partir de 2002 permet d'affiner les comparaisons à partir de cette date, d'autant que les deux séries de 5 années hydrologiques constituant la période 2002-2012 (2002-2006 et 2007-2012) sont hydrologiquement relativement peu variables (pas d'années très humides, ni d'années très sèches), conduisant à des débits cumulés par station quasi stables d'une période à l'autre (diminution de seulement 3% en moyenne des débits entre les périodes 2002-2006 et 2007-2012 ; voir Fig. 24 A), ainsi qu'à des valeurs $W_{2\%}$ (réactivité hydrologique du bassin versant amont), elles-aussi, relativement stables entre périodes même si une augmentation significative est notée pour 88% des stations (voir Fig. 24 B).

Sur les Figures 24 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** C et D représentant les flux de la période 2007-2011 en fonction de ceux de la période 2002-2006, on note que quasiment tous les points se trouvent sous la droite 1:1 (94 et 88% des flux de P_{dis} , et de P_{tot} , respectivement), indiquant une diminution globale des flux annuels entre ces deux périodes. En moyenne, et en considérant l'ensemble des stations, les flux de P_{dis} ont diminué de 16% (Tableau 6), ceux de P_{tot} diminuant de 29% (Tableau 7).

Cette diminution globale des flux est supérieure à l'incertitude pour 45% des stations dans le cas du P_{dis} , et pour 57% d'entre elles dans le cas du P_{tot} , (voir Fig. 25). Par ailleurs, l'analyse de cette diminution station par station montre que ce sont les stations présentant des valeurs initialement élevées ou intermédiaires du flux qui ont subi les plus fortes diminutions.

Cette tendance à la baisse des flux entre 2002-2006 et 2007-2011 est d'autant plus significative que la réactivité hydraulique des bassins versants a sensiblement augmenté entre ces deux périodes (Fig. 24B), traduisant un accroissement possible de la composante ruissellement, accroissement susceptible de générer en retour une augmentation des apports de P agricole diffus au cours d'eau. Très probablement, des changements au niveau des sources agricoles de P se sont produits pendant la même période qui ont contrebalancé l'effet à la hausse des flux normalement attendu de l'augmentation de la réactivité hydraulique des bassins (ce point sera discuté plus avant dans la partie "discussion" de ce rapport).

Les cartes présentées dans les Figures 26 et 27 montrent l'évolution dans le temps de la distribution spatiale des flux de P_{dis} et de P_{tot} à l'échelle de la Bretagne. Quatre images successives de la variabilité spatiale des flux correspondant à quatre périodes successives sont présentées dans ces figures: 1992-1996, 1997-2001, 2002-2006 et 2007-2011. Conformément à la méthode de représentation utilisée dans cette étude et à l'augmentation dans le temps des stations de mesure, couplée à la réduction de la taille de leurs aires drainées amont, on note une densification de l'information spatiale avec le temps (diminution de la taille des bassins versants élémentaires renseignés du point de vue de leurs émissions de P_{dis} et de P_{tot}) couplée à une augmentation de la superficie totale renseignée. Dans chaque carte, les zones grises correspondent aux portions de la Bretagne non couvertes par la BD COUPLE, lesquelles se concentrent clairement sur le pourtour de la région à l'interface entre la Bretagne continentale et la zone côtière. Ces lacunes sont à relier directement à des lacunes de données au sein de la BD COUPLE, elles-mêmes liées soit à des lacunes de données dans les bases OSUR, SISE-EAUX et Banque HYDRO, soit à une insuffisance ou à une mauvaise qualité des données contenues dans ces bases sources.

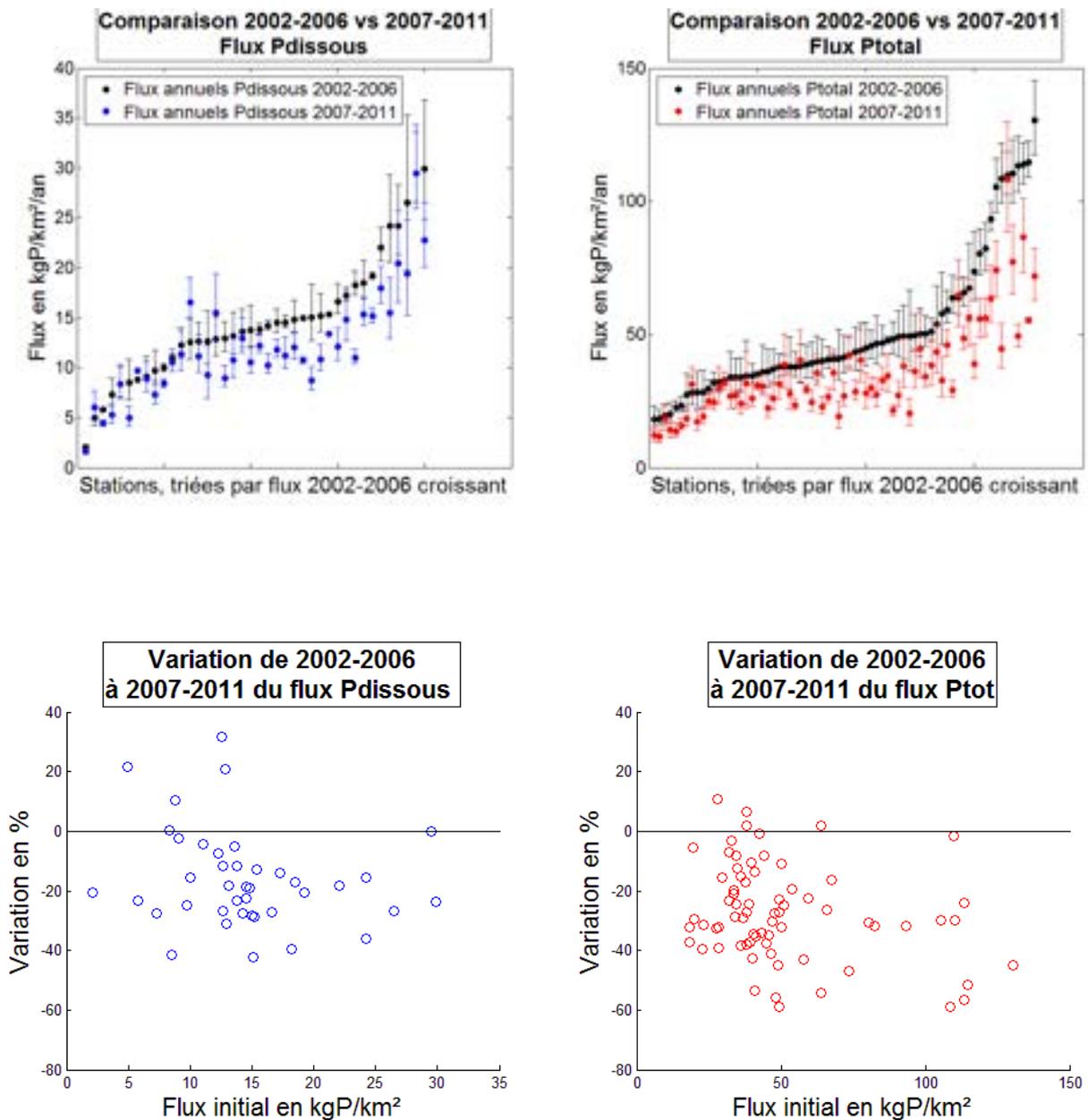


Figure 25: Haut : Evolution des flux de P_{dis} et de P_{tot} entre 2002-2006 et 2007-2011 pour les stations incluses dans la BD COuPIE en lien avec l'incertitude sur le flux. Les stations ont été classées par ordre croissant des flux calculés en 2002-2006. Bas : Evolution de la baisse du flux en fonction de la valeur du flux initial (i.e. du flux calculé en 2002-2006). Les baisses tendent à croître avec la valeur du flux initial.

La représentation en carte des flux de P_{tot} montre que si une différenciation est-ouest de la Bretagne existait en 1992-1996 avec des flux plus forts à l'ouest (Aulne, Elle, Elorn) qu'à l'est celle-ci n'a pas perduré ensuite. Elle n'était déjà plus vraie en 1997-2001, les flux de la partie est (Vilaine amont) étant aussi élevés que ceux de la partie ouest (Elorn, Odet). Elle l'est encore moins aujourd'hui. En fait, la caractéristique principale observée aujourd'hui en matière de distribution spatiale des flux de P_{tot} est celle d'un renvoi des bassins fortement contributeurs aux bassins versants amont de petite taille. Cette caractéristique est bien visible dans la carte correspondant à la période 2007-2011, carte dans laquelle plus aucun des bassins versants de grande taille (Oust, Vilaine, Aulne) ne rentre dans les deux graduations les plus élevées du flux, ces deux graduations étant réservées à des bassins de petite taille comme les BV des Abers, la partie amont du Trieux ou la partie amont de l'Oust. Le point important est que ces petits bassins gros contributeurs de P_{tot} coexistent spatialement avec des bassins également de petite taille mais, eux, faiblement à très faiblement contributeurs (cas de la partie nord des Côtes d'Armor, par exemple). Ainsi, la distribution spatiale des flux de P_{tot} observée aujourd'hui en Bretagne, à un moment où la densité de stations est suffisante pour révéler l'échelle caractéristique de la variabilité de ces flux, fait émerger un lien entre la valeur du flux et la taille de l'aire drainée que l'on peut exprimer comme suit : *la variabilité des flux de P_{tot} observée aujourd'hui en Bretagne augmente avec la diminution de la superficie de l'aire drainée, ou dit autrement, les flux de P_{tot} varient peu entre grands bassins, mais par contre beaucoup entre petits bassins*. Plus qu'une opposition est-ouest, c'est donc à une opposition entre grands et petits bassins à laquelle on a affaire en réalité, les premiers étant homogènes du point de vue de leur capacité à exporté du P_{tot} et faiblement à modérément exportateurs, les seconds étant très variables vis-à-vis de cette capacité, avec la coexistence parfois très localement de bassins fortement et faiblement contributeurs. La distribution spatiale des flux de P_{tot} ressemble de ce point de vue à celle des flux de matière organique dissoute pour laquelle la même relation entre flux et surface de l'aire drainée est observée.

Cette caractéristique a comme conséquence d'imposer un maillage spatial resserré des réseaux de suivi, avec l'intérêt très opérationnel et très pratique de pouvoir faire émerger où sont situées dans les territoires les bassins versants ou les portions de bassins versants très fortement contributrices de P_{tot} . Il est clair que ce type d'information (repérage spatial des bassins et sous-bassins versants les plus contributeurs) est un préalable essentiel à la compréhension des facteurs régulateurs des flux de P_{tot} , ainsi qu'au lancement d'actions de reconquête de la qualité de l'eau sur ce paramètre avec le souci i) d'en minorer les coûts (ciblage des mesures de reconquête aux seules portions des bassins le nécessitant), et ii) d'en maximiser les chances de réussite (traitement en priorité des flux forts).

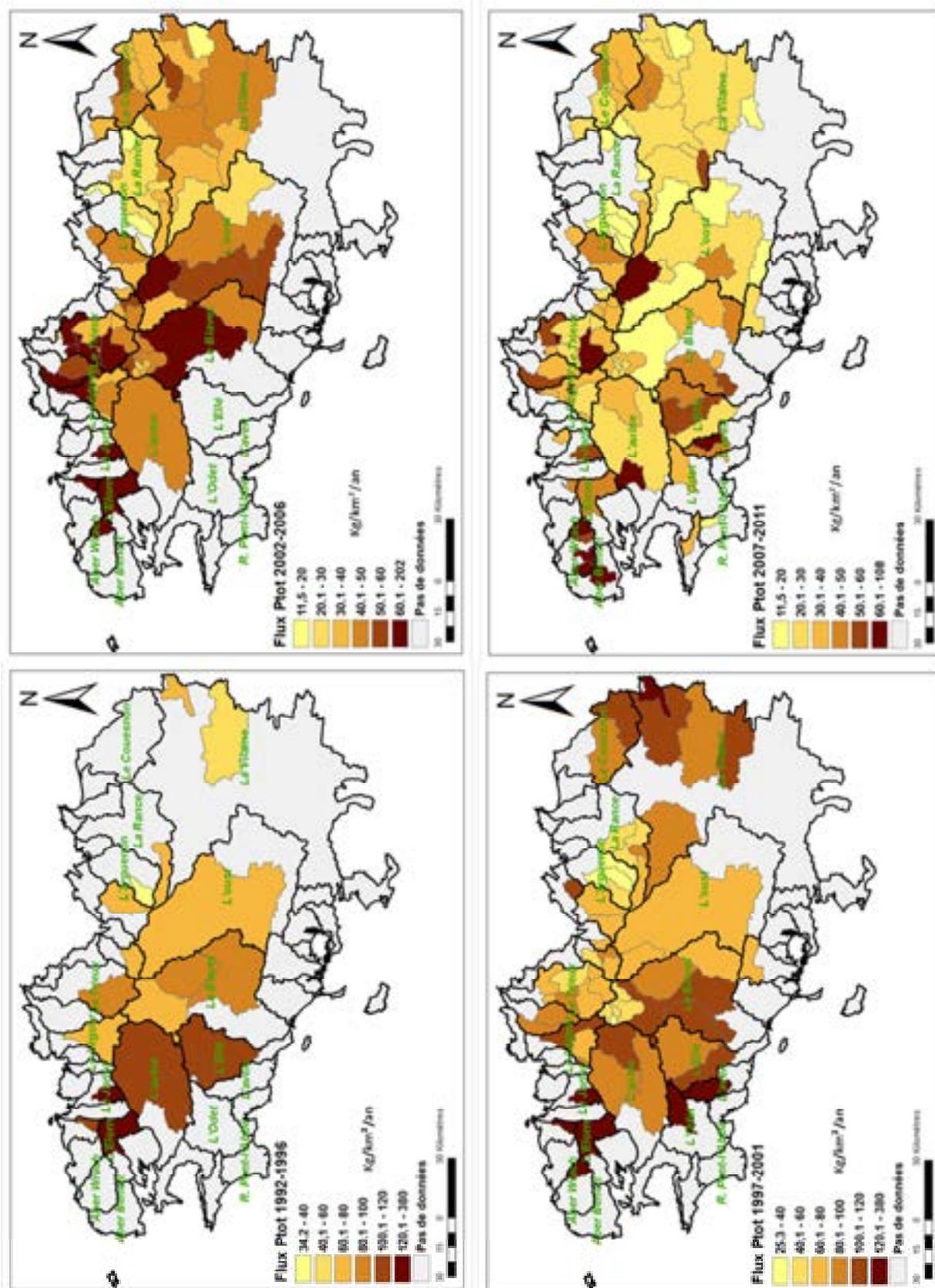


Figure 26 : Evolution en carte des flux de P_{tot} véhiculés par les rivières de Bretagne entre 1992 et 2012. Nota : l'échelle a été adaptée pour tenir compte de la diminution globale des flux.

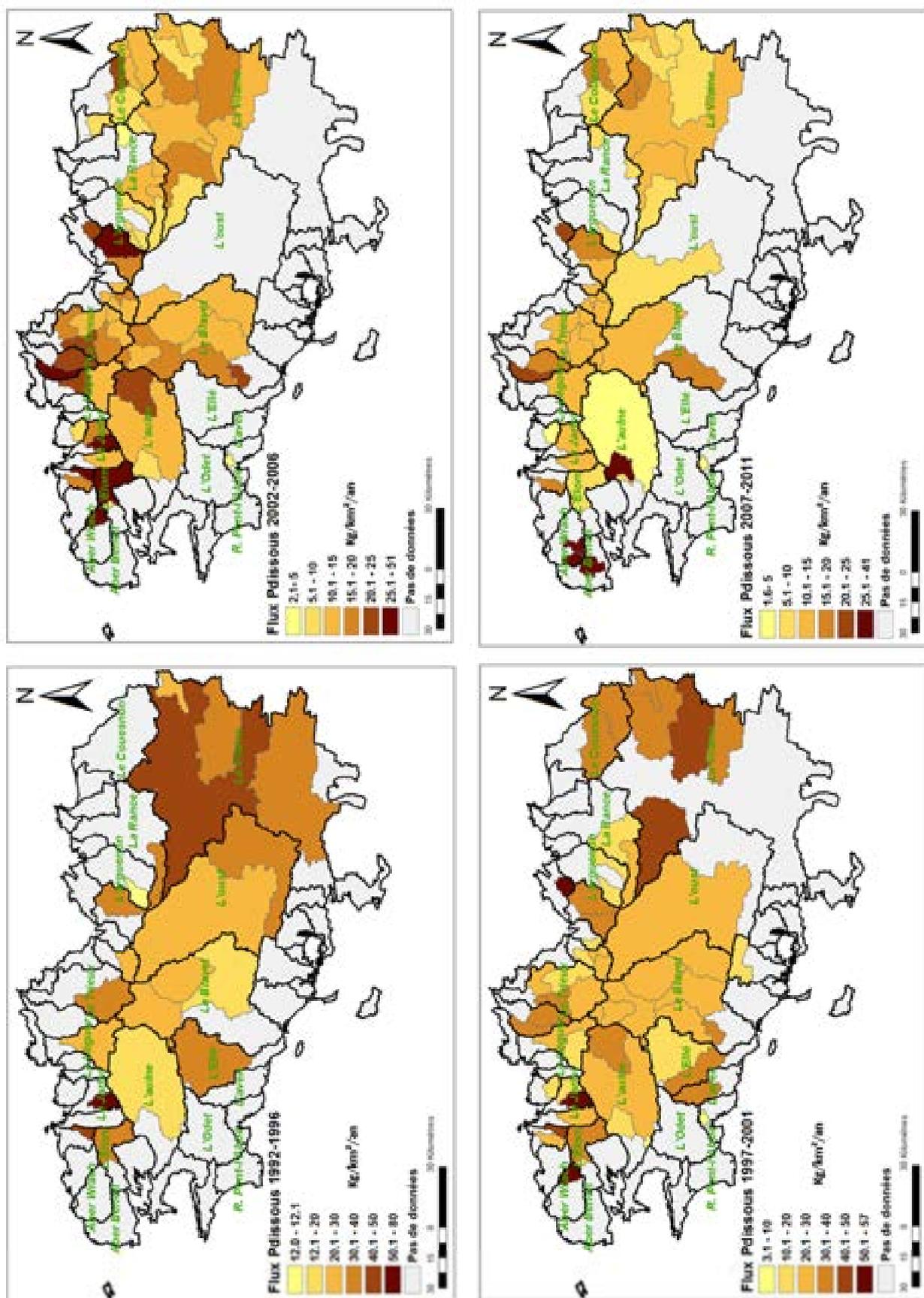


Figure 27 : Evolution en carte des flux de P_{dis} véhiculés par les rivières de Bretagne entre 1992 et 2012. Nota : l'échelle a été adaptée pour tenir compte de la diminution globale des flux.

L'image fournie par la distribution spatiale des flux de P_{dis} est sensiblement la même que celle fournie par la distribution des flux de P_{tot} . En effet, comme pour ces derniers, aucune réelle sectorisation de type est-ouest n'est perceptible, sauf peut-être lors de la période 1992-1996 où les flux de P_{dis} pouvaient apparaître sensiblement plus élevés à l'est qu'à l'ouest. Pour les trois autres périodes, le trait dominant est la restriction des bassins versants gros contributeurs de P_{dis} aux bassins versants de petite taille, avec là également la possibilité de voir ces bassins coexister avec des bassins de taille comparable mais faiblement exportateurs de P_{dis} . Comme pour le P_{tot} , on fait donc apparaître un lien entre variabilité et valeurs des flux de P_{dis} , et taille de l'aire drainée en amont du point de mesure, avec les mêmes conséquences du point de vue de l'implantation des stations et de la connaissance des facteurs régulateurs de ces flux.

Le fait que les mesures de P_{dis} et P_{tot} ne concernent pas toujours les mêmes stations ne permet pas de garantir que les bassins gros exportateurs de P_{tot} sont aussi de gros exportateurs de P_{dis} . On notera cependant l'existence d'une corrélation positive entre flux de P_{tot} et flux de P_{dis} pour la quarantaine de stations disposant de la double mesure pendant la période 2007-2011, avec l'existence de coïncidences avérées comme par exemple dans le cas de l'Aber Wrac'h et de l'Aber Benoit, tous deux gros exportateurs de P_{tot} et de P_{dis} (voir Figs. 26 et 27).

3.4.4. ESTIMATION DES FLUX GLOBAUX DE PHOSPHORE ARRIVANT AUX CÔTES ET DE LEUR EVOLUTION DANS LE TEMPS.

A partir des valeurs de flux spécifiques moyens calculés pour chaque période hydrologique de 5 ans et en posant l'hypothèse que ces flux moyens s'appliquent aussi aux portions du territoire de la Bretagne non couvertes par la BD COUPLE, il est possible d'estimer les flux de P_{tot} , P_{dis} et P_{part} (calculés comme la différence $P_{tot} - P_{dis}$) arrivant en moyenne chaque année aux côtes bretonnes, et ce en multipliant la moyenne des flux estimés plus haut la superficie de la Bretagne (27507 km²). Le Tableau 6 présente ces estimations pour les trois périodes pour lesquelles le nombre de couples station P – station débit est assez nombreux pour minorer les incertitudes, à savoir 1997-2001 ; 2002-2006 ; 2007-2011. Compte tenu des incertitudes associées aux flux et de la couverture spatiale seulement partielle qu'offre la BD COUPLE, chaque valeur de flux est assortie d'une hypothèse haute et d'une hypothèse basse, correspondant aux moyennes calculées en majorant ou minorant les flux de leur incertitude.

Ces estimations montrent que le flux de P_{tot} émis annuellement vers les côtes était en valeur moyenne de 2700 tonnes en 1997-2001, dont environ 30% (750 tonnes) sous forme dissoute, alors qu'il n'était plus que de 1100 tonnes, en valeur moyenne, en 2007-2011, dont environ 35% (360

tonnes) sous forme dissoute (Tableau 8), soit une diminution de 60% du flux de P_{tot} en 15 ans. La diminution n'a pas été la même en proportion suivant les formes du P. En effet, un écart de 10% environ est observé entre la baisse du flux de P_{part} (61%) et celle du flux de P_{dis} (52%) sur la période, suggérant une réduction proportionnellement plus forte des émissions de P_{part} par rapport aux émissions de P_{dis} . On notera que ces calculs et estimations nécessiteraient d'être affinées en incluant dans le calcul uniquement les stations situées les plus à l'aval, c'est-à-dire au plus près des débouchés des bassins versants directement dans le milieu marin. Un calcul rapide effectué pour la période 2007-2011 montre que le flux de P_{tot} estimé avec cette méthode plus rigoureuse pourrait être de 5% inférieur au flux de P_{tot} calculé en faisant la moyenne des flux calculés pour l'ensemble des stations de la BD COUPLE, indépendamment de leur localisation géographique dans les bassins versants. Ce résultat est cohérent avec le fait que les stations situées à l'exutoire des sous-bassins versants amont tendent à livrer des flux sensiblement supérieurs à ceux calculés à partir des stations situées plus à l'aval, surtout dans le cas du P_{tot} .

Evolution des flux de P annuel moyen en Bretagne

Flux		1997-2001			2002-2006			2007-2011			Diminution entre 1997 et 2011		
		Hyp. Basse	Moy.	Hyp. Haute	Hyp. Basse	Moy.	Hyp. Haute	Hyp. Basse	Moy.	Hyp. Haute	Hyp. Basse	Moy.	Hyp. Haute
$P_{dissous}$	kgP/km ² /an	23,4	27,3	31,2	14,1	15,6	17,7	11,9	13,2	15,1			
	Tonnes de P exportées par an	644	751	859	387	428	486	328	364	414	36%	52%	62%
P_{part}	kgP/km ² /an	48,0	62,4	77,0	32,4	37,4	44,0	19,9	24,3	30,1			
($P_{tot}-P_{dissous}$)	Tonnes de P exportées par an	1497	1939	2388	1008	1161	1363	626	762	940	37%	61%	74%
P_{tot}	kgP/km ² /an	71,4	89,7	108,2	46,5	53,0	61,6	31,8	37,5	45,1			
	Tonnes de P exportées par an	2141	2690	3247	1395	1590	1849	953	1126	1354	37%	58%	71%
Ratio $P_{dissous}/P_{tot}$	adimensionnel	0,33	0,30	0,29	0,30	0,29	0,29	0,38	0,35	0,33			

Tableau 8 : Estimation des flux moyens spécifiques (en kgP/km²/an) et totaux (en tonnes de P par an) de P_{tot} , P_{part} et P_{diss} , P_{part} exportés annuellement par la Bretagne. Les hypothèses hautes (Hyp. haute) et basses (Hyp. basse) correspondent aux estimations obtenues en majorant et minorant les flux calculés pour chaque station de leur incertitude. Les flux totaux annuels sont obtenus en multipliant les flux spécifiques annuels par la superficie de la Bretagne, soit 27507 km² (AGRESTE, 2013).

3.4.5. EVOLUTION ET DISTRIBUTION SPATIALE DES FLUX D'ÉTIAGE, ASSIMILÉS AUX REJETS PONCTUELS DE PHOSPHORE D'ORIGINE DOMESTIQUE ET INDUSTRIELLE

Les Figures 28 et 29 présentent l'évolution des flux spécifiques d'étiage de P_{dis} et de P_{tot} propagés sur l'année (i.e. exprimés en $\text{kgP}/\text{km}^2/\text{an}$), indicateurs supposés de la pression domestique et industrielle en P sur les cours d'eau. Les flux moyens de P_{tot} d'étiage ont été divisés par un facteur 2,5 en 25 ans, passant de $21,3 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ en 1987-1991 à $8,4 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ en 2007-2011, les flux moyen de P_{dis} d'étiage étant divisés, eux, par un facteur 3,2, passant de $13,9 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ à $4,4 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ sur la même période (voir également Tableaux 9 et 10). Comme pour les flux annuels moyens, les résultats obtenus pour l'ensemble des couples stations sont similaires à ceux calculés seulement pour les couples A1. La fiabilité et la représentativité des données s'accroissent par ailleurs au fur et à mesure que l'on se rapproche de la période actuelle. En effet, plus on se rapproche de l'actuel et plus le jeu de données pour les calculs est conséquent, atteignant 120 couples stations pour les flux d'étiage de P_{tot} et 95 couples pour leurs équivalents en P_{dis} .

Comme pour les valeurs des flux globaux annuels, on note une très grande variabilité inter-station des flux d'étiage (voir Tableaux 9 et 10). Les rapports entre les flux les plus faibles et les plus élevés sont compris entre 50 et 320 pour les flux de P_{dis} d'étiage suivant les périodes, et entre 50 et 200 pour le flux P_{tot} d'étiage, ce qui est très supérieur aux variations observés pour les flux annuels globaux de P_{dis} et de P_{tot} . Sur la période la plus récente (2007-2011), les flux d'étiage propagés sur une année ont varié entre 0,1 et $29,4 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ pour le P_{dis} et entre 0,3 et $47,5 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ pour le P_{tot} . Cette variabilité illustre la très forte variabilité spatiale des apports domestiques et industriels de P à l'échelle de la région. Sur cette même période, les flux de P_{dis} et de P_{tot} censés représenter les parts domestiques et industrielles des flux annuels globaux de P véhiculés par les rivières de Bretagne ont été en moyenne régionale respectivement de 4,4 et $8,4 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ (à comparer aux flux globaux annuels moyens de 13,2 et $37,5 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$; voir Tableau 8).

Les tendances temporelles décrites par les flux d'étiage de P_{dis} et P_{tot} ont été quantifiées station par station et comparées aux valeurs des flux observées en début de période. Trois périodes se terminant toutes en 2012 (dernière année de mesures injectée dans la BD COUPLE) ont été considérées (1992-2012, 1997-2012, 2002-2012), et ce pour tenir compte de la variabilité des débuts de période de mesure entre station. On remarque une tendance globalement négative entre le taux de diminution des flux de P_{dis} et P_{tot} d'étiage et les valeurs initiales prises par ces flux, indiquant que ce sont les stations connaissant les flux d'étiage les plus élevés en début de période qui ont enregistré les taux de diminution les plus importants, jusqu'à $-3 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ pour le flux de P_{dis} et jusqu'à $-4,7 \text{ kgP}/\text{km}^2/\text{an}$ pour le flux de P_{tot} (voir Fig. 30).

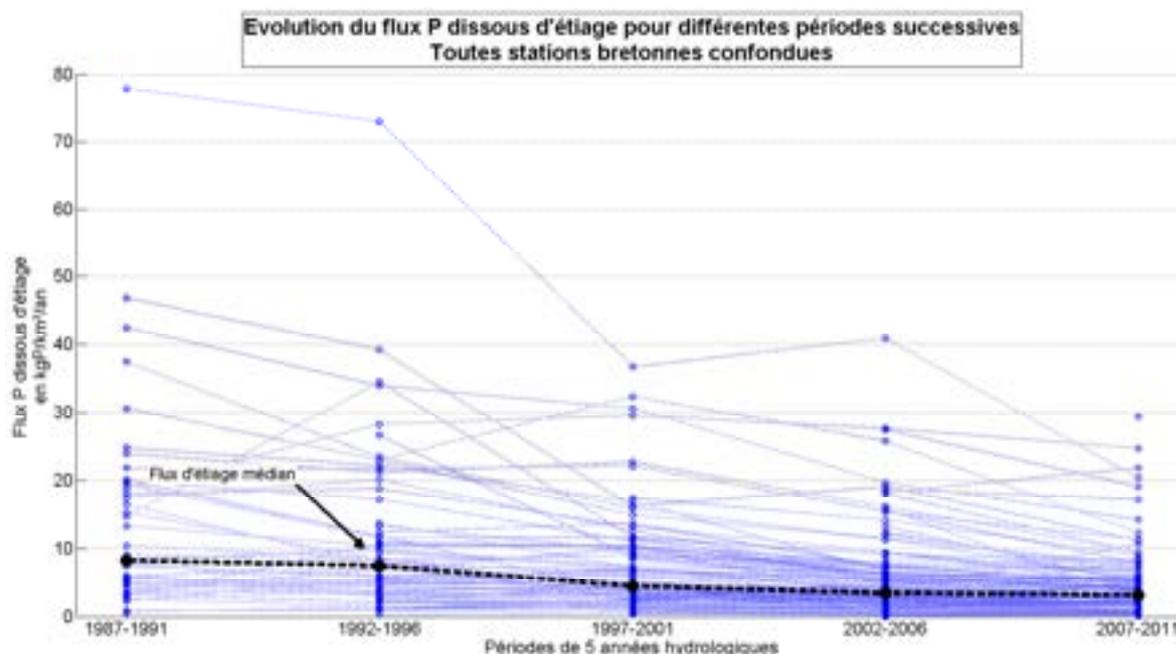


Figure 28 : Evolution des flux de P_{dis} émis par les rivières de Bretagne en période d'été depuis 1992. Les flux sont calculés par périodes de 5 années hydrologiques consécutives et exprimés en base annuelle, le flux d'été de P_{dis} étant considéré comme fournissant une approximation du flux total de P_{dis} domestique et industriel exporté annuellement par ces rivières. Les valeurs correspondant à une même station sont reliées entre elles. La courbe en tirets pointillés bleu épais décrit la médiane des moyennes sur la période.

		Flux $P_{dissous}$ d'été annuel moyen				
		1987-1991	1992-1996	1997-2001	2002-2006	2007-2011
		kgP/km ² /an	kgP/km ² /an	kgP/km ² /an	kgP/km ² /an	kgP/km ² /an
Toutes stations	Min	0,6	0,3	0,3	0,1	0,1
	Max	77,8	73,0	36,7	40,9	29,4
	Médiane	8,4	7,6	4,2	3,3	2,9
	Moyenne	13,9	11,2	6,6	5,3	4,4
	Nombre Couples	27	46	72	92	95
	Facteur Max/Min	122	258	112	279	321
Stations classée A1	Min	0,6	1,4	0,3	0,1	0,1
	Max	77,8	73,0	36,7	40,9	24,7
	Médiane	8,1	7,0	4,8	3,7	3,7
	Moyenne	13,2	10,5	7,5	6,1	4,9
	Nombre Couples	17	27	37	51	53
	Facteur Max/Min	122	53	112	279	270

Tableau 9 : Evolution des flux de P_{dis} d'été « moyen annuel » calculés par période de 5 années hydrologiques consécutives depuis 1987-1991, pour l'ensemble des stations de la BD COUPLE. Sont présentés les résultats globaux pour tous les couples ayant un code qualification B3 ou meilleur et les résultats pour les couples ayant le meilleur code qualification A1. La ligne *Nombre couples* donne les nombres de couples station P - station-débit utilisés pour le calcul des médianes, moyennes, maximales et minimales. Les valeurs des flux d'été, station par station, sont disponibles en annexe.

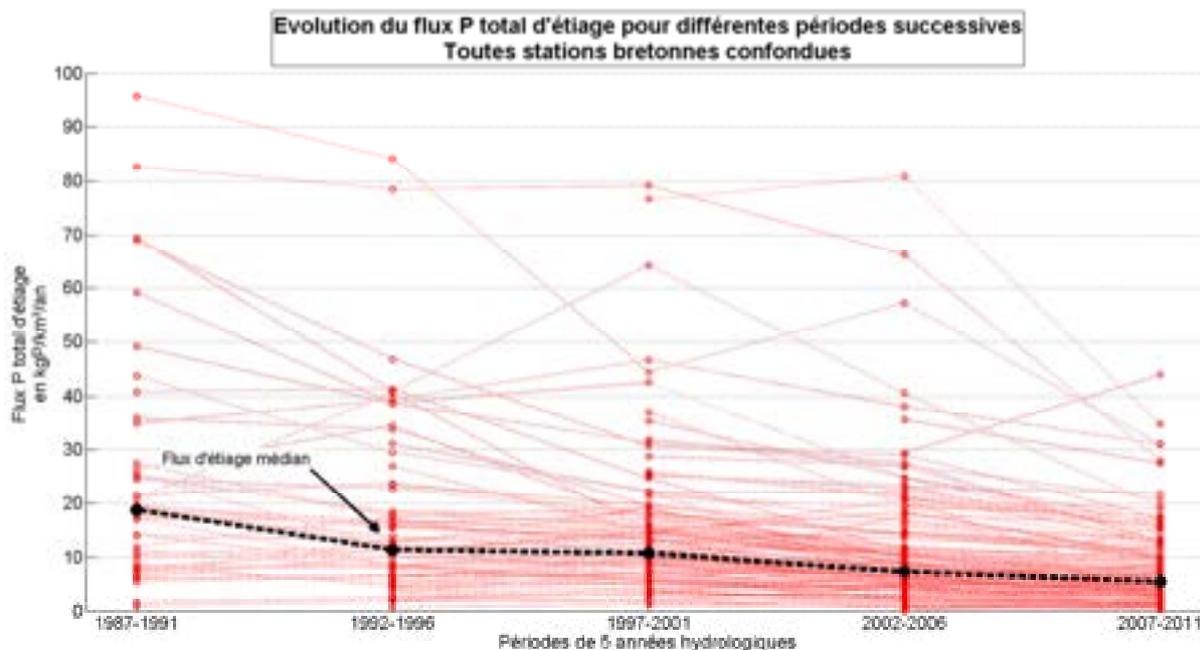


Figure 29 : Evolution des flux de P_{tot} émis par les rivières de Bretagne en période d'étiage depuis 1992. Les flux sont calculés par périodes de 5 années hydrologiques consécutives et exprimés en base annuelle, le flux d'étiage de P_{tot} étant considéré comme fournissant une approximation du flux total de P_{tot} domestique et industriel exporté annuellement par ces rivières. Les valeurs correspondant à une même station sont reliées entre elles. La courbe en tirets pointillés bleu épais décrit la médiane des moyennes sur la période.

		Flux P_{tot} d'étiage annuel moyen				
		1987-1991	1992-1996	1997-2001	2002-2006	2007-2011
		kgP/km ² /an	kgP/km ² /an	kgP/km ² /an	kgP/km ² /an	kgP/km ² /an
Toutes stations	Min	1,0	0,6	1,2	0,4	0,3
	Max	95,7	84,2	76,6	80,9	47,5
	Médiane	15,6	11,5	9,8	6,7	5,4
	Moyenne	21,3	15,7	13,0	10,5	8,4
	Nombre Couples	30	54	88	116	120
	Facteur Max/Min	100	133	65	196	170
Stations classée A1	Min	1,0	1,8	1,2	0,4	0,3
	Max	95,7	84,2	76,6	80,9	44,0
	Médiane	14,1	11,3	10,8	7,2	9,1
	Moyenne	20,0	15,2	14,7	12,1	9,1
	Nombre Couples	19	31	47	68	70
	Facteur Max/Min	100	48	65	196	158

Tableau 10 : Evolution des flux de P_{tot} d'étiage « moyen annuel » calculés par période de 5 années hydrologiques consécutives depuis 1987-1991, pour l'ensemble des stations de la BD COUPLE. Sont présentés les résultats globaux pour tous les couples ayant un code qualification B3 ou meilleur et les résultats pour les couples ayant le meilleur code qualification A1. La ligne Nombre couples donne les nombres de couples station P - station-débit utilisés pour le calcul des médianes, moyennes, maximales et minimales. Les valeurs des flux d'étiage, station par station, sont disponibles en annexe.

Seules trois stations présentent de très légères augmentations de ces deux flux sur la période, ces trois stations ayant en commun la caractéristique de présenter des flux d'étiage très faibles. Quelques stations ne présentent par ailleurs pas d'évolution significative sur une des trois périodes (pente de la tendance égale à 0). A trois exceptions près, ces stations concernent également des stations caractérisées par des flux d'étiage très faibles en début de période.

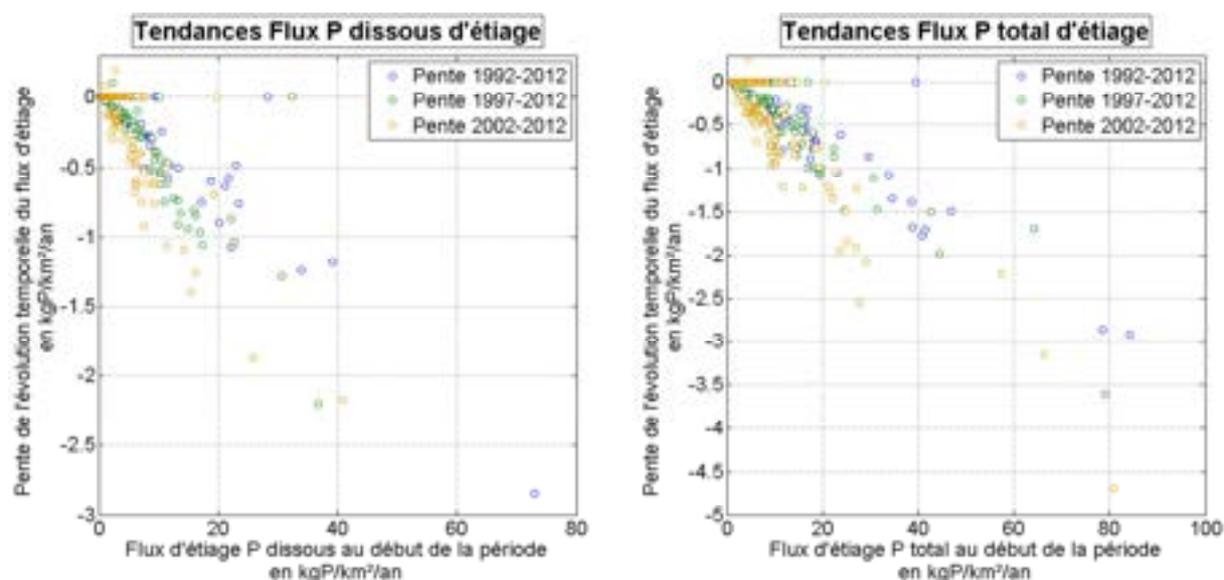


Figure 30 : Relation entre la diminution dans le temps des flux d'étiage de P_{dis} et de P_{tot} et les valeurs de ces flux en début de période. On note une corrélation négative entre les taux de diminution et les valeurs des flux en début de période indiquant que ce sont les stations présentant les flux initiaux les plus élevés qui ont enregistré les plus fortes diminutions des flux de P d'étiage. Les couples station P – station débit ne présentant pas d'évolution significative pendant la période (pente = 0) correspondent quasiment tous à des stations présentant des flux d'étiage faibles en début de période.

Les diminutions observées peuvent avoir deux origines, soit i) une diminution des débits d'étiage pouvant induire une diminution des flux calculés, soit ii) une diminution des apports en P domestique et industriel au cours d'eau. Une analyse de covariance a été réalisée pour tester l'hypothèse d'un rôle du débit dans les tendances observées, et quantifier le pourcentage de variance du flux d'étiage que ce rôle pourrait avoir engendré. Sur l'ensemble des couples station P – station débit montrant une diminution significative des flux de P_{tot} et de P_{dis} d'étiage depuis le début des mesures, ce pourcentage est relativement faible, étant de 22 à 30% pour les flux de P_{tot} d'étiage et de 13 à 19% pour les flux de P_{dis} d'étiage (Tableau 11). Pour chaque période d'analyse, la médiane des pourcentages pour l'ensemble des stations est située sous la moyenne indiquant que pour une majorité de station les variations de débit ont un rôle encore plus faible sur les tendances. Le débit n'est donc pas la cause principale des diminutions des flux de P_{tot} et de P_{dis} d'étiage enregistrées sur quasiment toutes les stations bretonnes pour lesquelles un flux d'étiage peut être calculé.

L'hypothèse la plus probable est donc celle d'une baisse généralisée des émissions de P_{tot} et de P_{dis} d'origine domestique et industrielle. Ce point sera discuté plus avant plus loin, dans la partie discussion de ce rapport.

Pourcentage de variance expliquée par celle du débit sur la période						
	Flux P_{dissous} d'étiage			Flux P_{tot} d'étiage		
	1992-2012	1997-2012	2002-2012	1992-2012	1997-2012	2002-2012
Moyenne	13%	18%	19%	22%	27%	30%
Médiane	10%	15%	18%	21%	24%	29%
Nombre de couples	36	53	47	47	61	71
	Concentration P_{dissous} d'étiage			Concentration P_{tot} d'étiage		
	1992-2012	1997-2012	2002-2012	1992-2012	1997-2012	2002-2012
Moyenne	4%	5%	9%	4%	4%	8%
Médiane	1%	2%	7%	2%	2%	4%
Nombre de couples	36	44	37	47	61	71

Tableau 11 : Pourcentage de variance des variations des flux et des concentrations de P_{dis} et de P_{tot} d'étiage pouvant être expliqué par les variations des débits d'étiage sur les périodes considérées. Les pourcentages sont présentés sous forme de moyennes et de médianes pour chaque paramètre et sur l'ensemble des couples station P- station débit ayant pu être analysés sur la période considérée, dont le nombre est précisé.

L'évolution en carte des tendances ci-dessus confirme que la diminution des flux de P_{tot} d'étiage sur la période 1992-2012 est un fait général à l'échelle de la Bretagne. Aucune zone n'est laissée à l'écart. Un point très important ressortant de cette représentation est l'émergence d'un ralentissement de la baisse des flux au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'actuel. Ainsi la proportion de bassins montrant une baisse de leur flux de P_{tot} d'étiage est plus importante si l'on étend la période d'analyse dans le temps que si l'on restreint cette période aux années les plus récentes, configuration dans laquelle une majorité de bassin montre une stationnarité des flux. Quelle que soit la cause de la baisse, il semble donc que celle-ci ait atteint aujourd'hui son maximum d'effet.

Concernant la distribution spatiale des flux de P_{tot} d'étiage, et l'évolution dans le temps de cette distribution, on note, comme pour les flux globaux, la perte d'une pseudo différenciation est-ouest entre les périodes 1992-1996 et 2007-2011 (voir Fig. 32). Alors que la première période semblait concentrer les flux les plus forts à l'Ouest de la Bretagne, la seconde tend à faire disparaître cette opposition entre ouest et est. A nouveau, ce qui apparait est une tendance à ce que les flux les plus forts se limitent à quelques sous-bassins amont de relativement petite taille, avec parfois une cohabitation spatialement très proche entre ces sous-bassins et des équivalents à l'inverse très peu

exportateurs.

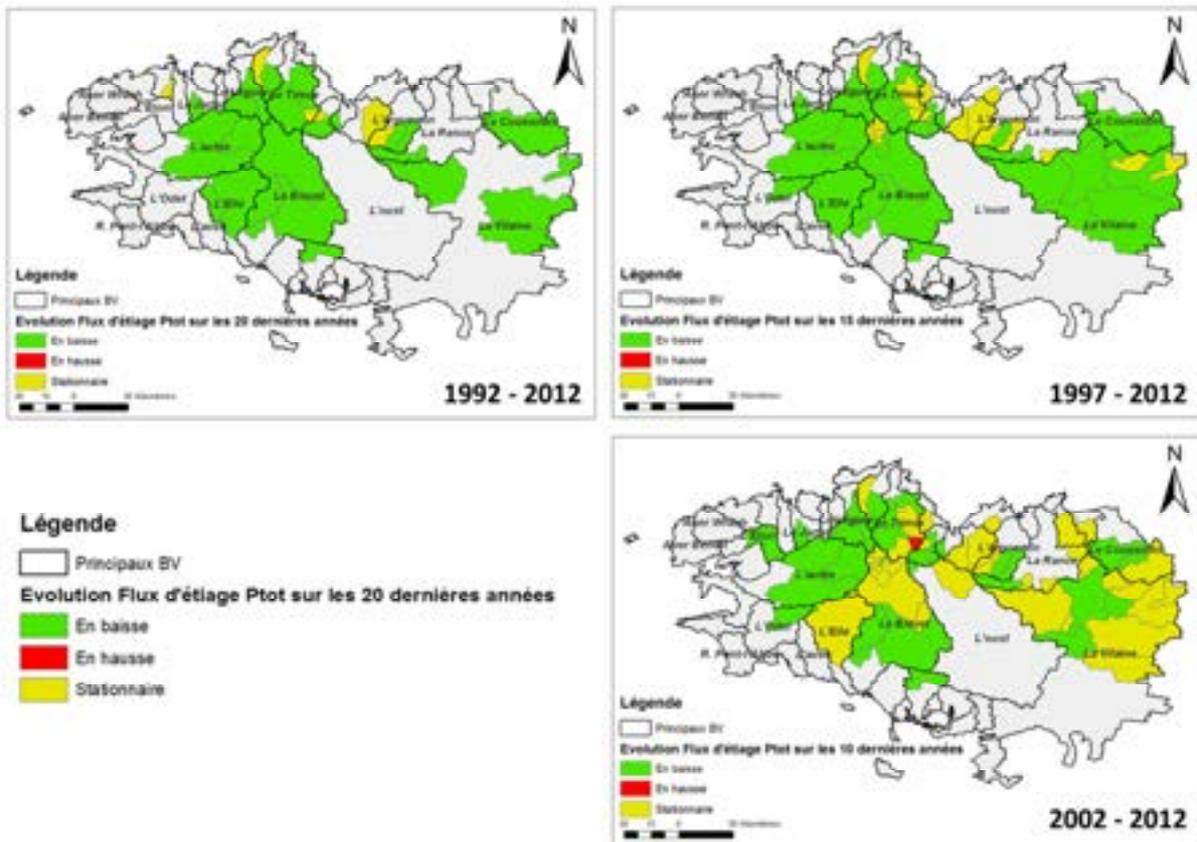


Figure 31 : Evolution en carte des flux de P_{tot} d'étiage (assimilées aux émissions de P_{tot} d'origine domestique et industrielle) sur les 20, 15 et 10 dernières années. Un ralentissement très net de la baisse des flux est constaté dans la période récente.

Contrairement au flux globaux pour lesquels l'évolution de la distribution en carte des flux s'effectue en parallèle d'une augmentation du nombre de stations utilisables pour le calcul des flux aboutissant à une densification des stations, notamment vers l'amont, cette co-évolution entre répartition des flux et densité du réseau de mesure n'a pas lieu dans le cas des flux de P_{tot} d'étiage, ceux-ci pouvant être approchés de manière fiable à l'aide d'un nombre très limité de mesures. On peut donc émettre l'hypothèse que l'opposition est-ouest enregistrée en début de période n'était pas un artéfact mais une vraie opposition entre l'ouest et l'est de la Bretagne du point de vue des émissions de P d'origine domestique et industrielle et que les quelques bassins et sous-bassins de l'ouest et du centre-ouest de la Bretagne présentant encore aujourd'hui des flux forts constituent des îlots hérités des périodes antérieures au sein desquels les pressions domestiques et industrielles sont restées fortes.

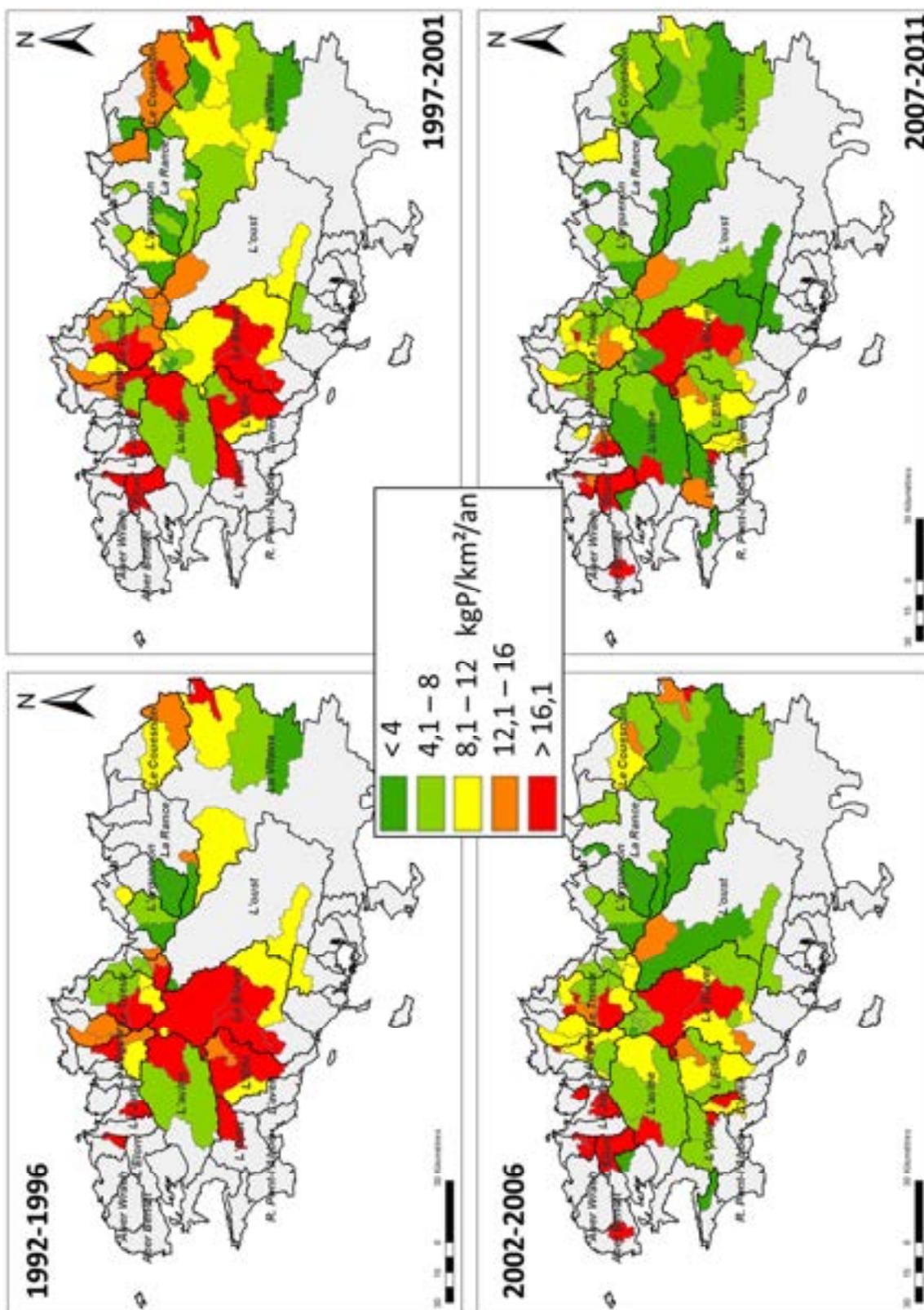


Figure 32 : Représentation en carte des flux de P_{tot} d'été émis par les bassins versants bretons lors 4 dernières périodes hydrologiques de 5 ans considérées dans cette étude. Les flux calculé à l'emplacement d'un couple station P – station-débit est affecté à l'ensemble du bassin versant amont.

3.5. CALCUL ET EVOLUTION DES PARTS DIFFUSES AGRICOLES ET PONCTUELLES DOMESTIQUES/INDUSTRIELLES DANS LES FLUX GLOBAUX ANNUELS

La propagation sur l'année du flux d'étiage et la soustraction de ce flux propagé au flux total émis annuellement permet d'estimer les parts respectives des sources agricoles et domestiques/industrielles dans les flux, et d'évaluer comment ces parts évoluent dans le temps et dans l'espace. Deux hypothèses sont implicites dans cette approche. D'une part le fait que les sources agricoles sont entièrement déconnectées des cours d'eau lors des étiages ; d'autre part, l'hypothèse que les flux domestiques et industriels ne varient pas significativement au cours de l'année sur une base hebdomadaire/mensuelle (base temporelle de définition de l'étiage). Partant de ces hypothèses, nous avons calculé la part (en %) des émissions domestiques et industrielles de P dans les flux totaux estimés pour chaque station de la BD COUPLÉ par périodes de 5 années hydrologiques consécutives, en corrigeant les flux des variations interannuelles d'hydraulicité. La période couverte va de 1992 à 2012.

Les résultats (Tableau 12) montrent que la part des sources domestiques et industrielles de P est restée stable du point de vue du P_{tot} sur la période considérée, cette part représentant entre 14 et 22% du flux de P_{tot} en moyenne. Concernant le P_{dis} la part calculée est plus importante, entre 25 et 37% du flux total de P_{dis} suivant les années, ce qui est cohérent avec le fait que les émissions de P domestique et industrielle sont censées être dominées par les formes dissoutes du P. Du point de vue de l'évolution dans le temps, on constate une tendance à la diminution de la part domestique/industrielle du flux, celle-ci étant passée en 20 ans de 37 à 30% du flux total.

		1992-1996	1997-2001	2002-2006	2007-2011
P_{dis}	Min	6%	2%	3%	6%
	Max	88%	68%	99%	87%
	Médiane	33%	19%	28%	27%
	Moyennes	37%	25%	34%	30%
	Nbr de couples	16	30	30	15
		1992-1996	1997-2001	2002-2006	2007-2011
P_{tot}	Min	7%	2%	1%	1%
	Max	56%	35%	50%	70%
	Médiane	19%	14%	16%	17%
	Moyennes	22%	14%	17%	18%
	Nbr de couples	17	48	73	104

Tableau 12 : Part des émissions domestiques et industrielles dans les flux de P_{tot} et P_{dis} émis par les rivières de Bretagne.

ZOOM SUR LES COUPLES DU RESEAU ECOFLUX

Une évaluation plus précise de l'évolution de la part du flux domestique et industriel (assimilé au flux d'étiage propagé sur l'année) sur le flux total annuel de P_{dis} peut être effectuée à partir des stations du réseau ECOFLUX, localisées dans le Finistère, celles-ci disposant d'une fréquence hebdomadaire de mesure garantissant des incertitudes plus faibles sur les flux globaux et les flux d'étiage ($\leq 10\%$). De plus, cette fréquence élevée permet de calculer les flux sur une base annuelle (et non pas par période de 5 ans comme pour les stations basse-fréquences), permettant une analyse plus fine des tendances temporelles.

Les résultats (Tableau 13 et Figure 33) confirment la tendance observée sur l'ensemble des stations de la BD COUPLE sur deux plans. D'une part, la diminution dans le temps de la part des sources domestiques et industrielles dans le flux total de P_{dis} (division par un facteur 2 en 15 ans) ; d'autre part, le fait que les émissions domestiques et industrielles représentent aujourd'hui moins d'un tiers du flux total de P_{dis} .

Les données du réseau ECOFLUX confirment ainsi que l'on a assisté du point de vue du P_{dis} aux mêmes changements constatés ailleurs en France et en Europe du point des sources contribuant aux flux de P_{dis} , à savoir une transition depuis un équilibre ou une dominance des sources domestiques et industrielles par rapport aux sources agricoles il y a vingt ans, à une très nette dominance aujourd'hui de ces dernières, les sources agricoles représentant 70% ou plus en moyenne du total du flux.

Station	Evolution du flux d'étiage corrigée des variations d'hydraulicité	R ² de la régression	Part des émissions domestique/industriel (moyenne 1998-2001)	Part des émissions domestique/industriel (moyenne 2009-2012)
	<i>kgP/km²/an</i>			
Dourduff	-0,21	0,51	33%	16%
Dossen	-0,38	0,18	59%	35%
Penzé	-0,88	0,64	65%	34%
Guillec	-0,53	0,33	57%	29%
Elorn	-0,61	0,42	84%	26%
Douffine	-0,14	0,65	71%	36%
Saint-Laurent	-0,01	0,01	21%	20%
Moyenne	-0,39	-	56%	28%

Tableau 13 : Evolution du flux d'étiage et de la part des sources domestiques/industrielles dans les flux de P_{dis} véhiculés par les rivières du réseau ECOFLUX

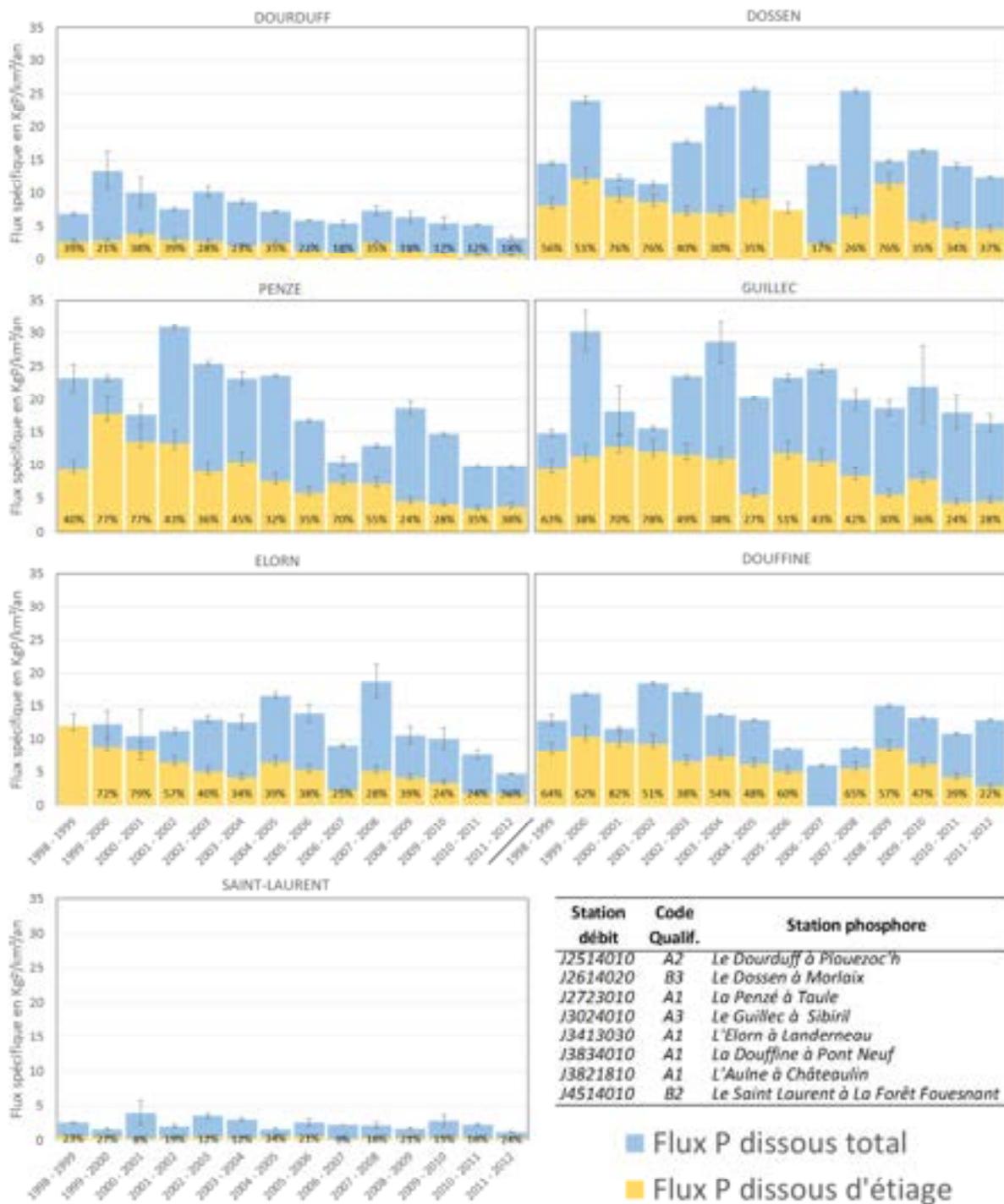


Figure 33 : Evolution comparée des flux de P_{dis} et de la part des sources domestiques/industrielles (assimilée au flux d'étiage propagée sur l'année) dans ces flux pour les stations du réseau ECOFLUX.

4. DISCUSSION

L'étude présentée dans ce rapport est la première étude jamais réalisée de manière à i) déterminer l'évolution rétroactive des flux de P en Bretagne, ii) analyser la variabilité spatiale actuelle et passée de ces mêmes flux, et enfin iii) estimer la part des émissions diffuses agricoles et ponctuelles domestiques/urbaines dans la construction des flux, avec l'objectif de déterminer quelle est parmi ces deux grandes sources, celle qui est la plus prégnante aujourd'hui. Trois résultats majeurs ressortent de l'analyse de la BD COUPLE, que nous rappelons ici :

- i) Du point de vue des tendances temporelles, on note une diminution des flux depuis 25 ans, qu'il s'agisse des flux de P_{part} ou de P_{dis} . Pour les premiers, la diminution a été en moyenne de 60% ; pour les seconds elle a été en moyenne de 50%. Cette diminution a touché l'ensemble des bassins versants avec cependant des diminutions proportionnellement plus fortes pour les bassins qui avaient au départ (en 1987) les flux les plus élevés. Cette diminution généralisée des flux a conduit à une diminution des flux globaux de P_{part} et de P_{dis} exportés de la Bretagne vers son littoral. L'étude réalisée permet de chiffrer les émissions globales actuelles de P_{part} et de P_{dis} aux côtes bretonnes à respectivement 1100 et 360 tonnes/an, contre respectivement 2690 et 750 tonnes/an il y a 15 ans. En matière de P_{tot} , l'estimation faite ici est relativement en retrait de celle faite antérieurement de 3000 à 4500 tonnes de P_{tot} exportées chaque année aux côtes bretonnes, dépendant des flux d'eau annuels (Aurousseau, 2001 ; CSEB, 2003). Les estimations fournies ici sont cependant globales et ne disent rien de l'existence ou non de points chauds d'émission au droit de certains estuaires. Le temps a manqué pour se livrer à une analyse détaillée de comment ces flux globaux se décomposent d'un estuaire à l'autre, et d'une côte à l'autre.
- ii) Du point de vue de la variabilité spatiale des flux, l'étude ne confirme pas de gradient est-ouest des flux, sauf peut-être en tout début de la période analysée (1992-1996). Ce qui ressort plutôt c'est une variabilité spatiale aléatoire, caractérisée par un éclatement des flux entre des flux forts et des flux faibles lorsque la taille de l'aire drainée diminue. Cet éclatement peut déboucher sur la coexistence locale de bassins versants faiblement et fortement exportateurs de P. Ce résultat qui vaut aussi bien pour les flux de P_{tot} que pour les flux de P_{dis} suggère l'intervention de facteurs de contrôle ou de mécanismes s'exerçant à cette même échelle comme causes des variabilités observées.
- iii) Enfin, du point de vue de la part respective des sources diffuses agricoles et des sources ponctuelles domestiques/industrielles, les résultats présentés ici montrent une diminution de la part des secondes, avec comme manifestation la plus tangible la diminution observée des

flux de P_{dis} en période d'étiage. Sur la base des résultats obtenus dans cette étude on peut estimer que la part des sources domestiques/industrielles sur les flux de P_{dis} et de P_{tot} est aujourd'hui très inférieure à ce qu'elle était il y a 15 ans, ne représentant plus au maximum et en moyenne que 30% du flux de P_{dis} et 20% du flux de P_{tot} . Il ressort de ce résultat que les sources diffuses agricoles sont aujourd'hui en moyenne très largement dominantes dans la construction des flux de P_{dis} et de P_{tot} émis par les rivières de Bretagne.

On pourra rétorquer que ces résultats sont basés sur l'analyse de séries basse-fréquences, lesquelles conduisent à des incertitudes élevées sur les flux, incertitudes pouvant jeter le doute sur leur fiabilité. On pourra également pointer que les estimations des parts des sources diffuses agricoles et ponctuelles domestiques/industrielles sont dépendantes d'hypothèses simplificatrices et donc sujettes à caution. Sans sous-estimer ces deux difficultés et limites de l'étude, nous souhaitons mettre en avant ci-dessous plusieurs arguments confortant à notre avis les résultats et premières interprétations avancées ci-dessus.

4.1. VALIDATION DES SERIES BASSES FREQUENCES COMME OUTILS FIABLES D'ESTIMATION DES FLUX ET TENDANCES LONG-TERMES

La méthode utilisée ici pour minorer les erreurs et exploiter au mieux les séries basse-fréquences des concentrations en P_{tot} et P_{dis} disponibles en Bretagne a été de combiner les données par séries de cinq années hydrologiques consécutives et ce afin de réduire les incertitudes. Comme nous l'avons déjà souligné ceci a été rendu possible par le fait que les quatre groupes de cinq années hydrologiques consécutives considérées dans cette étude ne se distinguent pas les uns des autres du point de vue de leur hydraulicité moyenne. Par ailleurs, aucune tendance à la hausse ou à la baisse des débits n'a été détectée lors de la période analysée. Ceci fait que les tendances long-termes à la baisse observées ne peuvent pas être imputées à une variation des débits, que ce soit pour les flux globaux ou les flux d'étiage (voir Tableau 11).

Plusieurs autres points militent pour la réalité des tendances et variabilités observées. Le premier est que la variabilité totale des flux entre stations est très supérieure aux erreurs individuelles calculées au sein de chaque station. Le deuxième est que les tendances dans le temps sont uniformes. Toutes les stations montrent des flux à la baisse, dont l'amplitude s'organise de manière non quelconque dépendant de la valeur du flux (voir Fig. 25). Nous n'observons pas d'évolution divergente entre stations, ni d'évolution erratique des flux entre périodes (l'ordre des stations en termes de valeur du flux reste globalement le même). Surtout, les tendances observées pour les stations basse-fréquences ne diffèrent pas des tendances observées pour les stations suivies à plus

haute fréquence du réseau ECOFLUX. C'est vrai pour la diminution long-terme des flux. C'est vrai également pour la diminution de la part des sources domestiques/industrielles, avec une part actuelle de ces sources estimée à 30% du flux total de P_{dis} pour les stations du réseau ECOFLUX, soit un chiffre moyen rigoureusement identique à celui observé pour l'ensemble des stations incluant les stations des réseaux basse-fréquences (voir Tableaux 12 et 13). Enfin, dernier argument ressortant également de la comparaison des résultats issus des stations de plus haute fréquence du réseau ECOFLUX avec ceux obtenus à partir des stations des réseaux basse-fréquences des réseaux OSUR et SISE-EAUX : en comparant ces deux ensembles de résultats, on constate que la gamme de variations des flux de P_{dis} décrite par les stations du réseau ECOFLUX bénéficiant d'incertitudes réduites ($\leq \pm 10\%$) balaye quasiment en totalité la gamme décrite par les stations des réseaux basse-fréquences, pour lesquelles les erreurs sont plus importantes (voir Figure 34). Nous considérons que cette coïncidence démontre que la variabilité des flux calculés à partir des stations basse-fréquences n'est pas un artefact de calcul, mais décrit une réelle opposition entre des bassins versants faiblement et fortement émetteurs de P_{dis} .

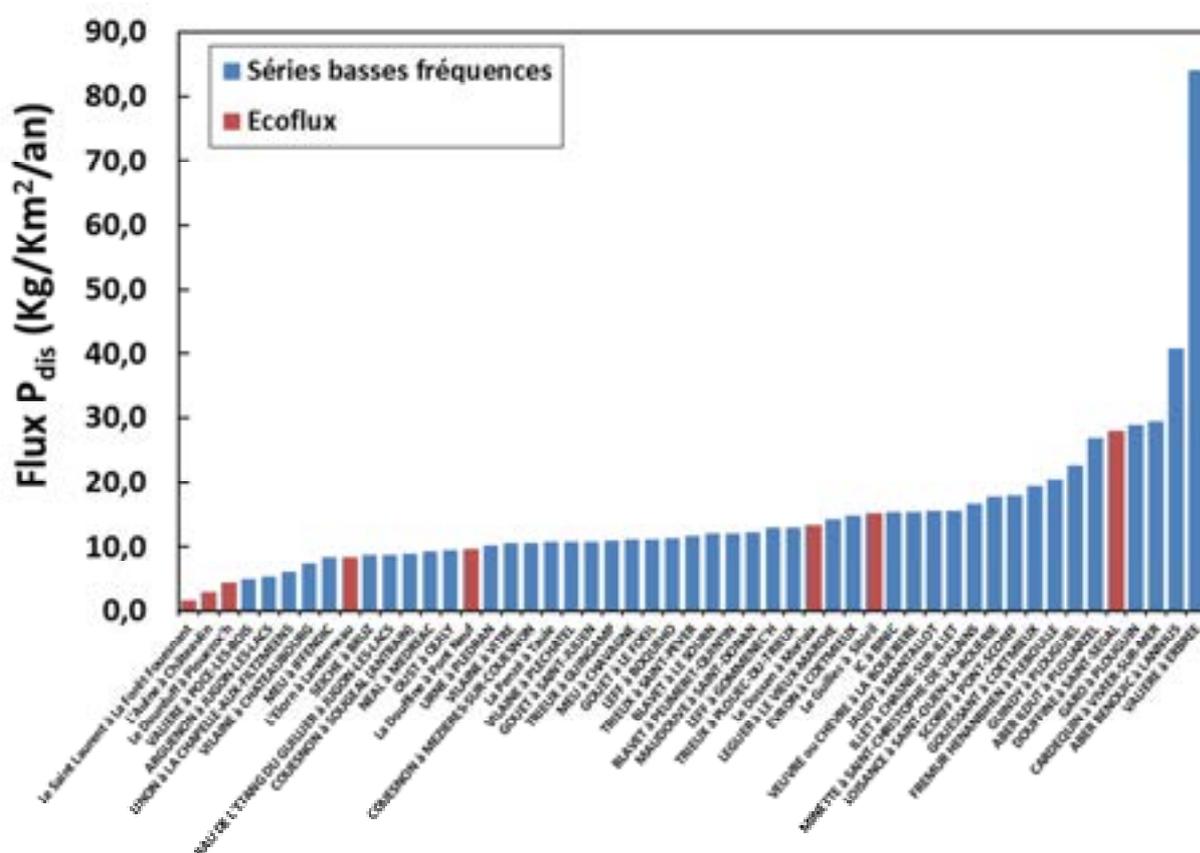


Figure 34 : Comparaison des flux de P_{dis} calculés pour les stations basse-fréquences des réseaux OSUR et SISE-EAUX avec ceux calculés pour les stations plus haute fréquence du réseau ECOFLUX. La période considérée est la période 2007-2011.

4.2. A PROPOS DU FLUX D'ÉTIAGE PRIS COMME MOYEN D'ESTIMER LA PART DES SOURCES DOMESTIQUES/INDUSTRIELLES DANS LE FLUX TOTAL ANNUEL

Une manière de tester la validité des hypothèses sous-jacentes à l'utilisation du flux d'étiage propagé sur l'année comme moyen d'estimer la part des sources domestiques/industrielles dans le flux total annuel consiste à examiner la variation du rapport des concentrations P_{part}/P_{tot} , station par station, mois par mois, les sources ponctuelles domestiques et industrielles étant censées mobilisées une plus grande proportion de P_{dis} par rapport aux sources diffuses agricoles, plus mobilisatrices de P_{part} . La Figure 35A dans laquelle sont représentées les moyennes mensuelles du rapport P_{part}/P_{tot} pour l'ensemble des stations de la BD COUPLE disposant de la double mesure (P_{tot}/P_{dis}) montre que l'hypothèse est globalement vérifiée, les valeurs de ce rapport étant clairement minimales entre juin et octobre, mois des étiages (moins de P_{part} en proportion). L'hypothèse d'une superposition de sources agricoles diffuses principalement mobilisées lors des épisodes de crue et conduisant à des émissions importantes de P_{par} , avec des sources ponctuelles domestiques et industrielles mobilisant, elles, principalement du P_{dis} et dont l'influence est maximale lors des étiages est par ailleurs validée, par la Figure 35B, figure démontrant que, pour une même station, le rapport P_{part}/P_{tot} est, à quelques rares exceptions près, toujours beaucoup plus élevé en période de crue qu'en période d'étiage.

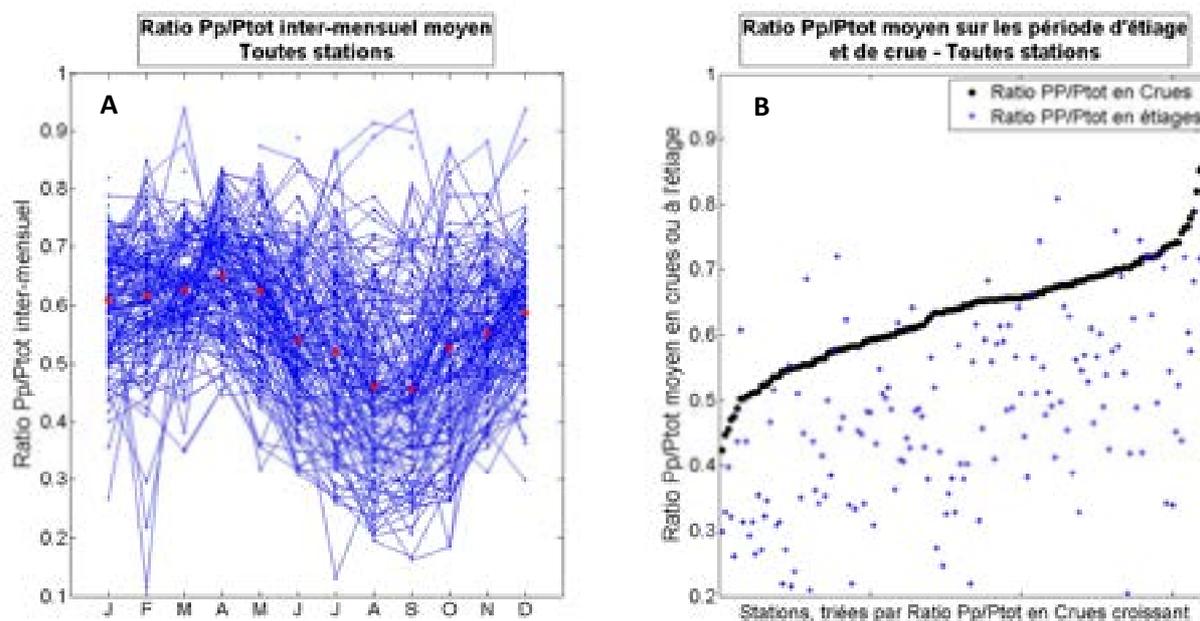


Figure 35 : A. Rapports P_{part}/P_{tot} inter-mensuels calculés sur toute la période de mesures disponible pour chaque station P de la BD COUPLIE. Les points rouges représentent la valeur médiane mensuelle calculée en regroupant l'ensemble des stations. B. Rapports P_{part}/P_{tot} moyens calculés en considérant les mesures appartenant uniquement aux *moments* de crue (points noirs) et *moments* d'étiage (croix bleues). Les stations sont triées par valeur croissante du rapport P_{part}/P_{tot} en crue.

Au-delà de ces deux éléments, deux autres arguments peuvent être avancés comme éléments de validation de l'utilisation du flux d'étiage propagé sur l'année comme moyen d'estimer la part des émissions domestiques/industrielles dans les flux totaux annuels. Le premier argument est que la tendance à la baisse observée depuis 20 ans de cette part (tableaux 12 et 13) n'est pas un fait réservé à la Bretagne. En effet, cette tendance est une tendance générale observée aussi bien dans des fleuves comme la Loire et la Seine que dans des lacs comme les grands lacs alpins, avec le milieu des années 1980/le début des années 1990 comme période d'amorçage. L'image obtenue ici d'une diminution de la part des sources domestiques/industrielles dans les flux de P véhiculés par les rivières de Bretagne depuis le début des années 1990 est donc une image parfaitement attendue, à mettre sur le compte, comme ailleurs en France et en Europe, de l'amélioration des installations de traitement et de l'interdiction des phosphates dans les détergents domestiques et industriels. Le deuxième argument procède à nouveau de la grande cohérence des résultats – à la fois en termes de tendance et de proportion - observés entre les stations basse-fréquences des réseaux OSUR et SISE-EAUX et des stations de plus haute fréquence du réseau ECOFLUX. Cette cohérence donne clairement du poids à la méthode utilisée et à ses résultats.

Il reste néanmoins que nous ne prétendons pas que l'utilisation du flux d'étiage propagé sur l'année comme moyen d'estimer la part des sources domestiques et industriels dans les flux annuels de P conduit à une estimation rigoureuse et précise de cette part. Nous n'ignorons pas, par exemple, que des mécanismes de désorption du P contenu dans les sédiments de rivière peuvent survenir en été, et que la source ultime de ce P peut être agricole, gonflant ainsi artificiellement la part des émissions ponctuelles domestiques et industrielles. Alternativement, une partie du P domestique/industriel peut s'adsorber sur ces mêmes sédiments. Nous n'ignorons pas, non plus, que des variations temporelles peuvent exister dans les flux de P rejetés par les stations de traitement, liées par exemple à des variations saisonnières de la densité de population. Nous souhaitons simplement mettre en exergue que la cohérence des résultats entre eux et avec ce que l'on observe ailleurs en France et en Europe est un élément suffisant pour dresser les conclusions émises plus haut, à savoir que i) la part des émissions de P domestique et industrielles a fortement décru en Bretagne depuis 20 ans et ii) que cette part est aujourd'hui mineure dans les flux, que ce soit dans les flux de P_{part} que dans les flux de P_{dis} .

4.3. SIGNIFICATION ET CAUSES POSSIBLES DES TENDANCES LONG-TERMES ET DES VARIATIONS SPATIALES OBSERVEES

4.3.1. TENDANCES TEMPORELLES

Les données de flux issues de cette étude sont marquées par deux tendances long-termes superposées : d'une part une diminution généralisée des flux totaux annuels de P_{dis} et de P_{part} en 20 ans de l'ordre de 50 et 60% respectivement ; d'autre part une diminution également généralisée de la part des émissions domestiques et industrielles sur la même période (de l'ordre de $-0.39 \text{ KgP}_{dis}/\text{km}^2/\text{an}$ en 10 ans par exemple pour les stations du réseau ECOFLUX ; voir Tableau 13). Partant de là, la question surgit de savoir si la baisse des émissions domestiques/industrielles suffit à expliquer la diminution généralisée des flux totaux annuels. La réponse est fournie dans le Tableau 14 dans lequel sont reportées les parts des diminutions des flux totaux annuels de P_{tot} , P_{part} et de P_{dis} imputables à la diminution des émissions de P domestiques/industrielles. On voit que ces parts sont très faibles pour les flux de P_{part} (de l'ordre de 10%) et s'établissent aux environs de 20 à 30% pour les flux de P_{tot} et P_{dis} , suivant les périodes de calcul considérées.

Période de calcul	1992 à 2012	1997 à 2012	2002 à 2012
Flux P_{dis}	26%	32%	24%
Flux P_{part}	11%	9%	8%
Flux P_{tot}	20%	11%	31%

Tableau 14 : Part de la diminution des flux totaux annuels de P_{dis} , P_{part} et P_{tot} imputables à la diminution des émissions de P d'origine domestique et industrielle. Les valeurs présentées sont des valeurs moyennes obtenues en compilant l'ensemble des stations de la BD COUPLE.

Ainsi, les calculs montrent qu'il faut faire également appel à une baisse généralisée des émissions diffuses agricoles pour expliquer complètement la baisse des flux totaux de P_{tot} et P_{dis} observée en Bretagne depuis 20 ans. La seule diminution des émissions de P domestique/industriel ne suffit pas à expliquer cette baisse. Concernant les causes de la baisse des émissions diffuses agricoles, on ne peut pour l'instant qu'émettre des hypothèses. Une cause possible pourrait être la diminution relative de la teneur en P mobilisable des sols bretons. L'analyse des teneurs en P_{Olsen} et en P_{Dyer} contenues dans la BDAT et de l'évolution dans le temps de ces teneurs montrent en effet que les sols bretons ont subi un basculement du point de vue de la spéciation du P, marqué par une augmentation du rapport

P_{Dyer}/P_{Olsen} avec le temps. L'extractant utilisé dans la méthode Dyer étant plus "agressif" que celui utilisée dans la méthode Olsen, il est possible que cette augmentation traduise le passage d'une partie du P vers un compartiment moins mobile du P du sol, dont une des répercussion pourraient être la diminution des flux émis vers les eaux. Cette hypothèse se heurte cependant au fait que i) cette augmentation du rapport P_{Dyer}/P_{Olsen} est loin d'être vérifiée pour tous les sols et ii) devrait principalement concerner le P_{dis} et peu le P_{part} . Or, les baisses dans le temps les plus fortes (62%) concernent les flux de P_{part} . D'autres causes doivent donc être recherchées, plus aptes à limiter les émissions diffuses de P_{part} agricole. De ce point de vue, il nous semble raisonnable d'invoquer les mesures prises en Bretagne pour limiter l'érosion des sols et/ou le transport de particules au cours d'eau comme l'implantation généralisée de couverts hivernaux ou de bandes enherbées, ou encore la reconstitution dans certaines parties du territoire d'un réseau bocager relativement dense (programme Breizh Bocage). Très probablement, les baisses enregistrées sur les flux diffus agricoles de P_{tot} et de P_{dis} sont la conséquence de ces mesures, illustrant leur bienfondé en matière de lutte contre les pollutions diffuses par les matières phosphorées d'origine agricole.

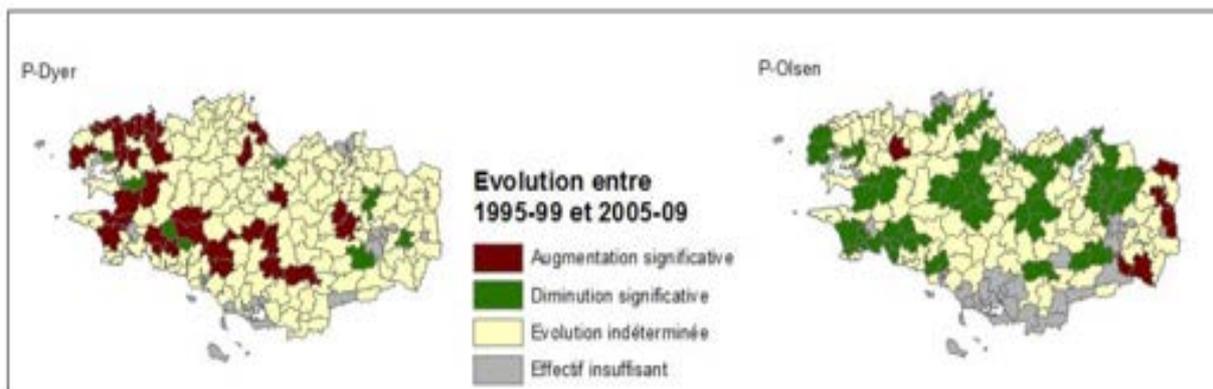


Figure 36 : Evolution cantonale des teneurs en P_{Dye} et P_{Olsen} des sols de Bretagne entre 1995 et 2009 (Moreira et Lemerrier, non publié ; Volet sol du projet Trans-P).

4.3.2. VARIABILITES SPATIALES

Bien que la diminution des émissions domestiques/industrielles soit un phénomène généralisé en Bretagne (Figure 31), on constate que des disparités spatiales existent, certains bassins versants continuant d'exhiber des flux domestiques/industriels élevés, notamment dans l'ouest de la Bretagne. Le temps a manqué à cette étude pour savoir si les bassins confrontés à ces flux élevés se distinguaient par des pressions urbaines/industrielles élevées, ou par un fort pourcentage d'installations de traitement particulièrement émettrices de P. Il est évident que la question des causes de ces flux résiduels domestiques/industriels élevés est posée et que cette étude, si elle ne

n'amène pas d'explication, fournit au moins un outil pour identifier les bassins confrontés à ces flux résiduels élevés, sur lesquels des diagnostics plus précis devraient être lancés.

Concernant la variabilité spatiale des flux totaux annuels, le point clé est le fait déjà mentionné plus haut de l'existence d'une relation entre la magnitude des flux et la taille de l'aire drainée. La Figure 37 montre que l'aire drainée en dessous de laquelle cette différenciation des bassins versants entre petits et gros exportateurs de P se situe aux alentours de 500 km². Au-delà de cette limite, on constate que le flux n'évalue pas ou peu avec l'augmentation de l'aire drainée, pour une période donnée. Outre le fait d'indiquer que les processus internes au cours d'eau n'ont très vraisemblablement que très peu d'impacts sur les flux aux grandes échelles spatiales, ce résultat implique que des facteurs ou des processus se déploient aux échelles spatiales inférieures, avec comme effet de générer une très grande variabilité spatiale des flux de P_{tot} et de P_{dis}.

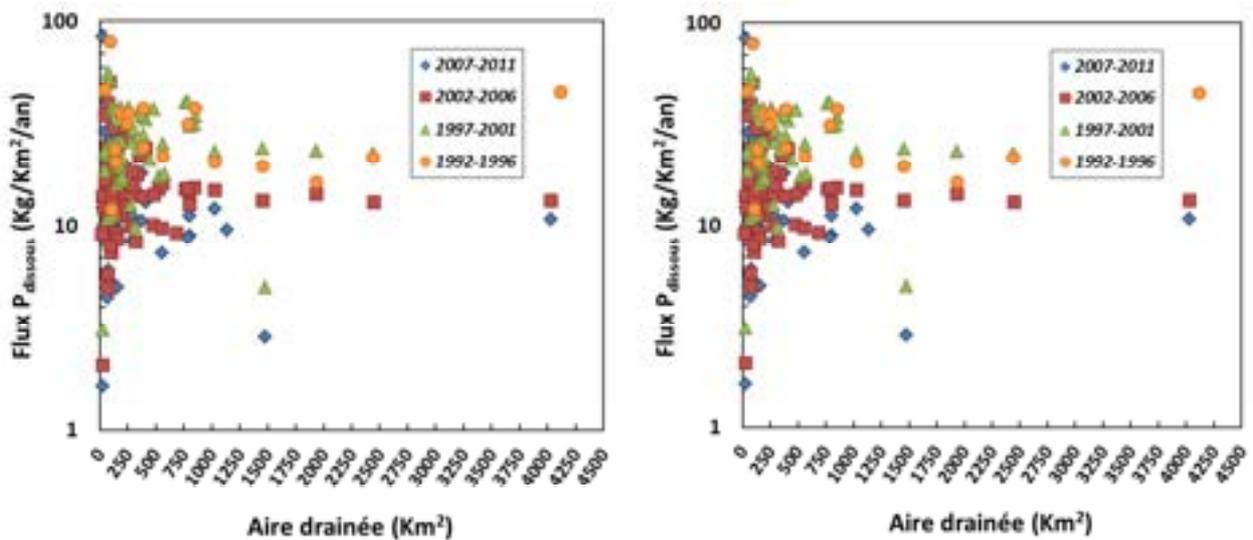


Figure 37 : Evolution des flux annuels de P_{tot} et P_{dis} dans les bassins versants bretons en fonction de la taille de l'aire drainée

Sachant que la majeure partie des flux de P_{tot} et de P_{dis} est constituée par des émissions diffuses de P d'origine agricole, il est raisonnable de penser que ces facteurs et/ou mécanismes ont à voir avec une ou plusieurs caractéristiques du sol, en lien avec les pratiques agricoles. Une possibilité qui vient immédiatement à l'esprit est la teneur en P du sol. Ce facteur vaut la peine d'être examiné car des variations spatiales importantes des stocks de P des sols existent en Bretagne à l'échelle infra 500 km², comme le montre la Figure 38A. La confrontation de la variabilité des stocks de P du sol avec la variabilité des flux montre que des coïncidences existent effectivement comme dans la partie nord du Finistère où on note la coexistence de flux forts et de teneurs en P des sols élevées (Figure 38).

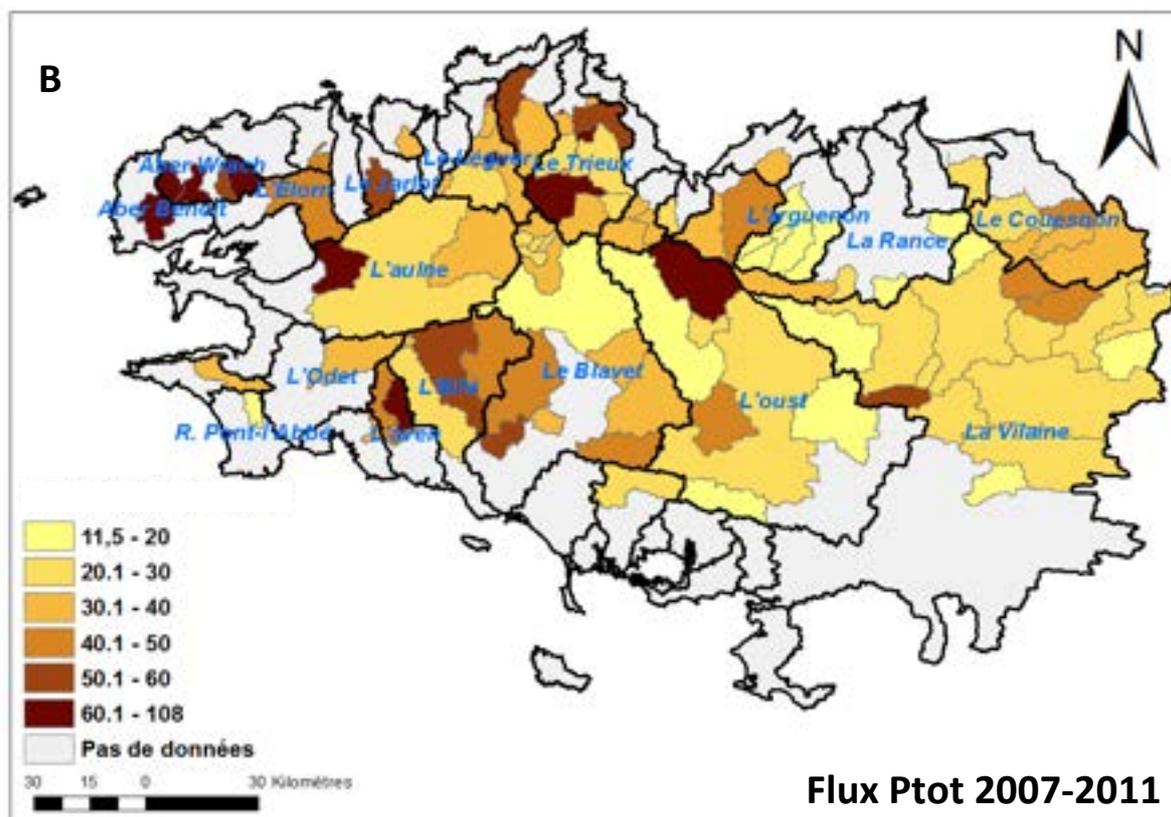
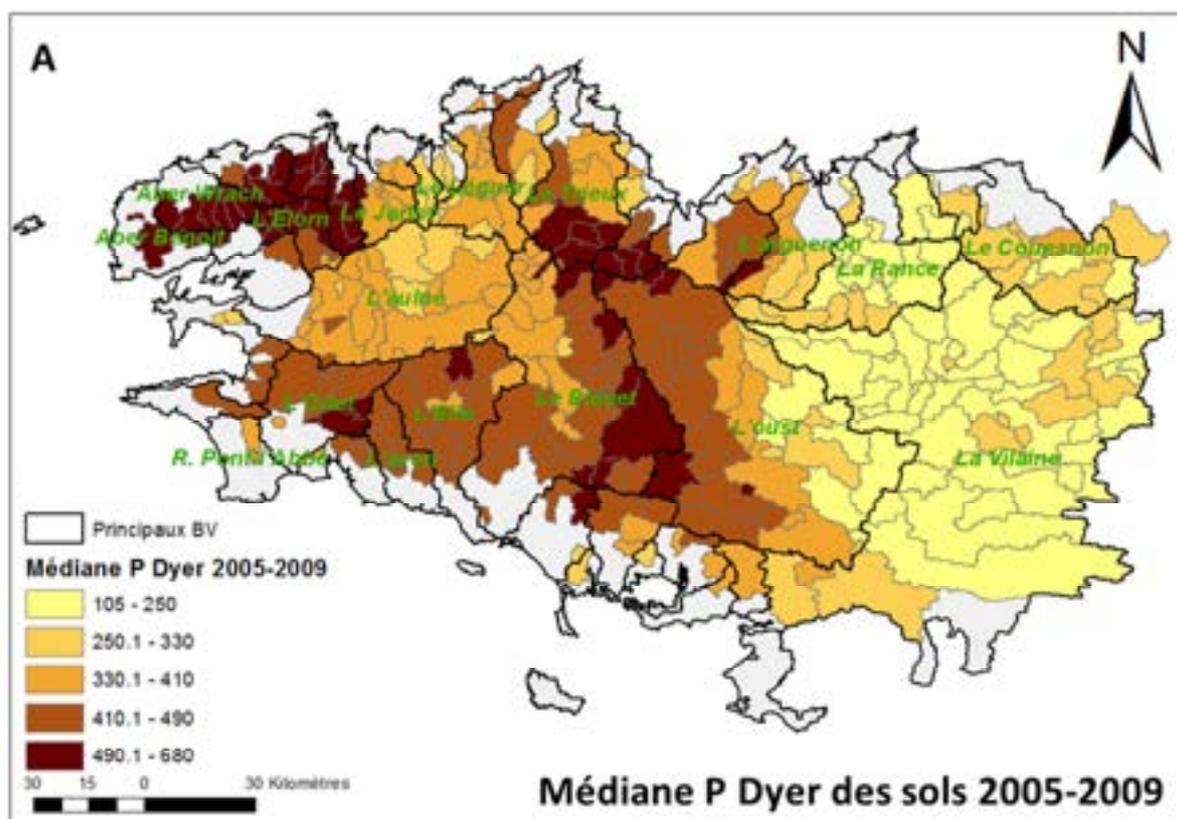


Figure 38 : A. Carte des concentrations médianes communales en P_{Dyer} des sols bretons agrégées à l'échelle des sous-bassin-versants de la BD COUPLE. Les données sols proviennent de la BDAT et leur traitement statistique spatialisé a été effectué dans le cadre du volet 1 du projet TRANS-P (Moreira et Lemerrier, non publiés). B. Carte des flux hydriques spécifiques de P_{tot} (en $kgP/km^2/an$) par bassin versant sur la période 2007-2011.

Faut-il en conclure que la teneur en P des sols est le facteur de contrôle déterminant de la variabilité spatiale des flux de P_{tot} et de P_{dis} enregistrée dans les bassins versants bretons ? Nous pensons qu'une telle conclusion est prématurée sur deux arguments. Le premier est que les teneurs en P contenu dans la BDAT portent sur la fraction biodisponible du P, pas sur le P_{tot} des sols. Or les flux diffus de P_{tot} agricole sont en majorité construits par du P_{part} et non du P biodisponible. Le deuxième argument est que la superposition est loin d'être parfaite, notamment en centre Bretagne, région dans laquelle les teneurs en P biodisponible du sol sont élevées et les flux plutôt modérés à faibles comme dans la partie est du bassin du Blavet. Clairement, d'autres travaux sont nécessaires pour déterminer précisément la nature exacte des facteurs et mécanismes responsable de la variabilité des flux annuels de P_{tot} et de P_{dis} observée à petite échelle en Bretagne.

5. PERSPECTIVES

L'étude présentée ici, de par son caractère pionnier, fait apparaître plusieurs marges de progrès pour une meilleure connaissance des flux de P émis par les bassins versants bretons et une meilleure compréhension des sources et des facteurs/mécanismes à l'origine des tendances temporelles et variations spatiales observées. Des perspectives existent également dans le domaine très concret de la mise au point de méthodes affinées dans le domaine du diagnostic, utilisables par les acteurs de terrain. Nous passons en revue ci-dessous certaines de ces perspectives et évolutions.

5.1. ACCROITRE LE NOMBRE DE BASSINS VERSANTS RENSEIGNES ET AMELIORER LA PRECISION SUR LES FLUX

L'ensemble des cartes présentées dans cette étude présente des zones de blanc. Suivant les époques considérées, entre 30 et 60% du territoire n'est pas couvert par des données de flux, avec une absence souvent généralisée de couverture en zone littorale. La plupart du temps, cette absence est liée à l'impossibilité de coupler des stations de débit suffisamment proches des stations P. C'est le cas par exemple au niveau de la baie de Douarnenez où aucune station hydrologique ne peut être associée au 21 stations de mesure des concentrations en P implantées dans cette zone. Sans négliger la possibilité d'une densification dans le futur des stations de mesure des débits de l'eau en Bretagne, un travail de reconstitution des débits par modélisation est une piste potentielle pour générer à courts termes des données de débit dans ces zones dépourvues de station de débit, permettant ainsi d'améliorer la couverture spatiale des flux.

Concernant l'amélioration de la précision des calculs sur les flux, les marges de manœuvre portent à principalement sur l'incorporation dans la BD COUPLE de données supplémentaires actuellement

non archivées dans les bases ECOFLUX, SISE-EAUX et OSUR. Malgré des difficultés (hétérogénéité, protocoles de mesures, absence de bancarisation...), certaines sources pourraient être intéressantes à exploiter. Les suivis DREAL effectués par temps de pluie, bancarisés mais pour l'instant non accessibles, rentrent clairement dans cette catégorie. Ces données sont particulièrement intéressantes dans la mesure où, portant sur des périodes de crue, elles permettraient de mieux définir les relations concentrations-débits aux forts débits, c'est-à-dire précisément lors des moments contribuant le plus aux flux totaux annuels, et pour lesquels les incertitudes sont actuellement fortes du fait du nombre réduit de données disponibles. L'ajout de ces données dans la BD COUPLE devrait donc aboutir à une diminution significative de l'incertitude sur les flux, permettant en retour une meilleure définition des tendances temporelles et des variabilités spatiales.

Une autre approche possible que nous n'avons pas eu le temps de développer est la constitution de stations virtuelles de mesure, générées en rassemblant dans un même fichier les données issues de stations très proches géographiquement les unes des autres. Les réseaux ECOFLUX, SISE-EAUX et OSUR gérant un grand nombre de stations, il n'est en effet pas rare que des stations appartenant à l'un des réseaux soient localisées au même endroit ou à très courte distance d'une station gérée par un autre réseau. Les dates de prélèvements étant souvent différentes entre ces stations géographiquement très proches, leur combinaison au sein d'une même station virtuelle offrirait donc la possibilité d'augmenter la fréquence de mesure et donc de diminuer l'incertitude sur le flux. Des essais effectués dans les Côtes d'Armor ont montré que cette approche pouvait permettre de passer d'une fréquence de 12 ou 24 mesures/an à une fréquence de 36 mesures/an sur certains cours d'eau comme le Léguer. Du temps nous a manqué dans cette étude pour pouvoir appliquer cette approche plus globalement à l'échelle de toute la Bretagne. Procéder à ces combinaisons de stations est une démarche que nous préconisons pour les futures études.

5.2. EXTRAIRE DE NOUVEAUX INDICATEURS UTILES AU DIAGNOSTIC

La présente étude s'est focalisée sur les indicateurs *flux globaux annuels* et *flux d'étiage propagés sur l'année*, utiles pour évaluer les parts respectives des sources diffuses agricoles et ponctuelles domestiques/industrielles sur les flux. Un autre indicateur utile à développer serait le flux d'inter-cruve hivernal, ce flux intervenant à des moments où les processus d'érosion et de ruissellement superficiels sont réduits mais où les sols agricoles sont connectés à la rivière via les écoulements de nappe. Cet indicateur permettrait donc d'évaluer le *flux diffus agricole de sub-surface*, flux qui pourrait alors être séparé du flux diffus agricole transféré par ruissellement. La connaissance de ce flux diffus agricole de sub-surface est importante puisque le P transféré étant sous forme dissoute,

celui-ci est directement assimilable par des organismes et joue donc sans doute un rôle clé dans le processus d'eutrophisation. Evidemment, mettre en œuvre ce type d'indicateur ne peut se faire que sur des séries haute-fréquences (typiquement 1 mesure/jour), les périodes d'inter-crue hivernale étant des événements difficiles à capter (voir Fig. 11).

L'analyse des flux érosifs de P_{part} en crue et la recherche des sources de ce flux particulaire pourraient également bénéficier d'améliorations. Il existe par exemple dans certains bassins versants une relation linéaire entre les concentrations en P_{part} et teneurs en MES (Fig. 39). La pente de cette relation caractérise la richesse en P des particules, avec des valeurs variant d'un facteur 10 entre les bassins. Confrontée à la teneur en P_{tot} des sols (sols de versant, sols de berge,...), cette information sur la teneur en P des particules pourrait permettre de remonter à l'origine spatiale du flux érosif dans les bassins versants.

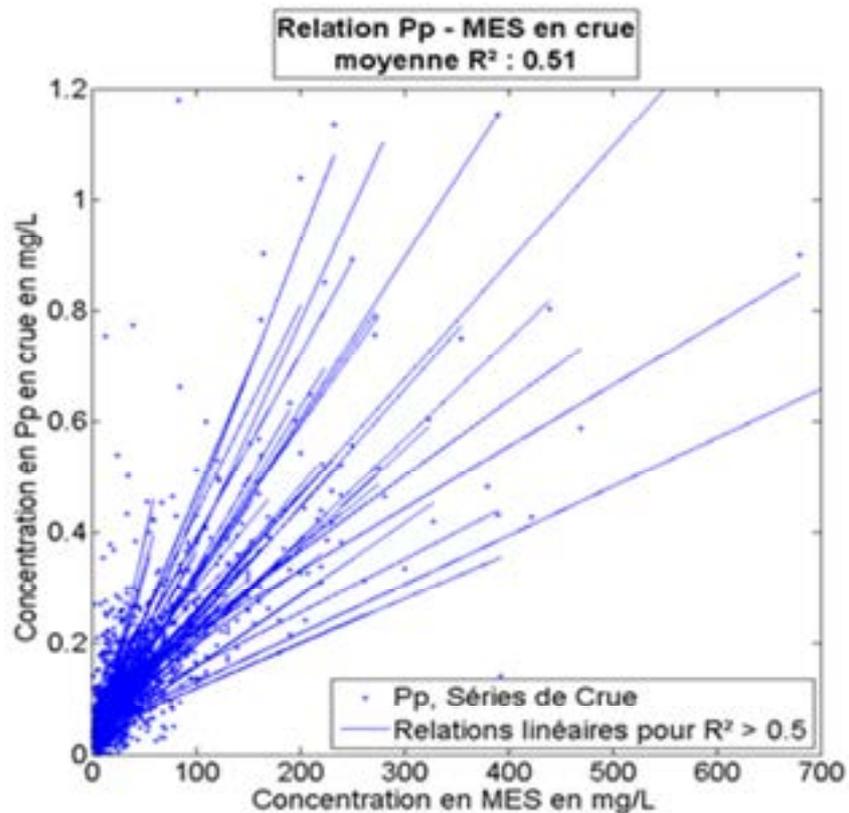


Figure 39 : Relation P_{part} -MES en crue au droit des stations référencées dans la BD COUPLE.. Sont représentés seulement les données des couples dont le R^2 de la relation est supérieure 0,5.

5.3. POUVOIR MIEUX CONFRONTER LES TENDANCES ET VARIABILITES A LEURS FACTEURS DE CAUSALITE POTENTIELLE

Le croisement de données de tendance et de variabilité des flux comme celle présentées dans cette étude avec des données sur les facteurs de causalité potentiels de ces tendances et variabilités ont la capacité de pouvoir être utilisées comme outils pour identifier précisément quelles sont les sources du P et les facteurs favorables à leurs connexion avec les eaux de surface, et définir ainsi des stratégies permettant d'en réduire les apports aux cours d'eau. La première perspective dans ce domaine concerne la mise en relation des données d'évolution du flux d'étiage avec les bases données disponibles sur l'évolution des rejets d'assainissement (SATESE) pour quantifier les impacts sur le milieu des mesures consenties en faveur de la qualité de l'eau (installations de stations d'épuration, mesures règlementaires...).

Concernant les sols, plusieurs facteurs et propriétés sont susceptibles de contrôler les transferts diffus de P des sols vers le réseau hydrographique : teneurs en P du sol (voir ci-dessus), densité du réseau bocager, pente, pratiques culturales, etc... La mise en relation des résultats de flux avec des variables représentatives de ces propriétés et facteurs a le pouvoir théorique d'en révéler l'impact. Se posent cependant le problème de la superposition de ces variables avec les variables flux, et de l'échelle à laquelle effectuer ces comparaisons. Très clairement, les résultats de cette étude montrent que l'échelle d'investigation à privilégier est celle des bassins versants d'aire drainée <500 km² (Fig. 37).

Un croisement entre les résultats de flux et les différents facteurs du sol et des paysages à cette échelle ou aux échelles inférieures est primordial dans la perspective de trouver des explications aux tendances temporelles et autres variabilités spatiales mises à jour dans cette étude. Pour le moment, toutes les variables nécessaires à cette analyse des causes ne sont ni forcément renseignées à ces échelles, ni bancarisées comme c'est le cas par exemple de la teneur en P_{tot} des sols ou du taux de saturation en P de ces mêmes sols, deux variables actuellement non renseignées aux échelles requises alors que ce sont deux variables clés pour comprendre et interpréter les transferts de P diffus agricole vers les cours d'eau.

Le prochain défi est donc le développement des méthodologies nécessaires à l'acquisition et à la bancarisation des données relatives aux facteurs *sols* et *paysages* à l'échelle de bassins versants d'aire drainée <500 km², pour attaquer vraiment et correctement la question des causes des tendances et variabilités observées, sachant que l'explication au final intègrera probablement une superposition de facteurs et de causes.

5.4. DES OUTILS DE DIAGNOSTIC POUR LES ACTEURS DE TERRAIN

Les données et méthodes présentées dans cette étude ont la capacité à être utilisées comme outils de diagnostic pour identifier précisément les sources du P et définir des stratégies pour diminuer les apports de P aux eaux de surface. La première approche utilisable est très clairement celle consistant à comparer les valeurs de flux à la surface drainée, cette approche ayant la capacité de déterminer l'échelle spatiale caractéristique de divergence des flux d'un bassin-versant. La mise en place de cette approche suppose évidemment de disposer d'un maillage suffisamment dense de suivi des teneurs en P au sein du réseau hydrographique incluant des sous-bassins versants amonts. Nous ne pouvons qu'encourager au développement de tels réseaux dans la mesure où le bénéfice pour le gestionnaire est la capacité à repérer au sein d'un bassin-versant quels sont les sous-bassins les plus contributifs de P, diagnostic important puisque c'est sur ces entités qu'il conviendra de focaliser les actions.

Une autre approche que nous préconisons est l'utilisation du test de Pettitt, pour détecter des ruptures dans les chroniques de concentrations en P et déterminer précisément les dates où ces ruptures se sont produites. L'intérêt et les potentialités de la méthode en matière de diagnostic sont illustrés au travers de l'analyse des chroniques des concentrations en P_{dis} mesurées pour la *Laïta* à Quimperlé. La Figure 40 compare ces chroniques aux chroniques de débit. Elle illustre une diminution depuis 1989 des maxima de concentration observés chaque année en période d'étiage. Nous avons voulu savoir si cette diminution avait été régulière ou bien si elle montrait une, ou des ruptures. L'application du test de Pettitt sur la série des flux d'étiage calculés entre 1989 et 2012 (Fig. 41) montre qu'une rupture s'est produite en septembre 2000 (diminution brutale du flux) avec une probabilité de rejet très faible. La baisse drastique observée du flux d'étiage indique qu'un changement majeur s'est opéré à cette période sur le bassin versant ayant conduit à une diminution rapide et très importante de la pression exercée par les rejets domestiques et industrielles sur la rivière. Partant de ce résultat, une analyse de l'évolution des équipements de traitements des rejets d'eau usée impactant la *Laïta* a été réalisée. Celle-ci a montré que des réaménagements des stations d'épuration des principales communes du bassin et des deux principales industries (abattoir et papeterie) avaient été réalisés à la fin des années 1990, réaménagements très probablement à l'origine de l'abattement observé du flux d'étiage en 2000.

Ainsi, malgré le faible nombre de mesures en période d'étiage (2,7 mesures par an, en moyenne), la méthode s'est avérée pertinente pour détecter une rupture dans la série et permettre de relier cette rupture à des aménagements effectués sur le bassin versant. Cette même démarche est donc tout à fait applicable à des chroniques de concentration basse-fréquence (12 mesures/an), avec des perspectives de diagnostic équivalente à celle présentée ici dans le cas de la *Laïta*. On

constatera en passant que l'exemple traité apporte une nouvelle démonstration du lien existant entre flux d'étiage et émissions ponctuelles de P domestique et industriel.

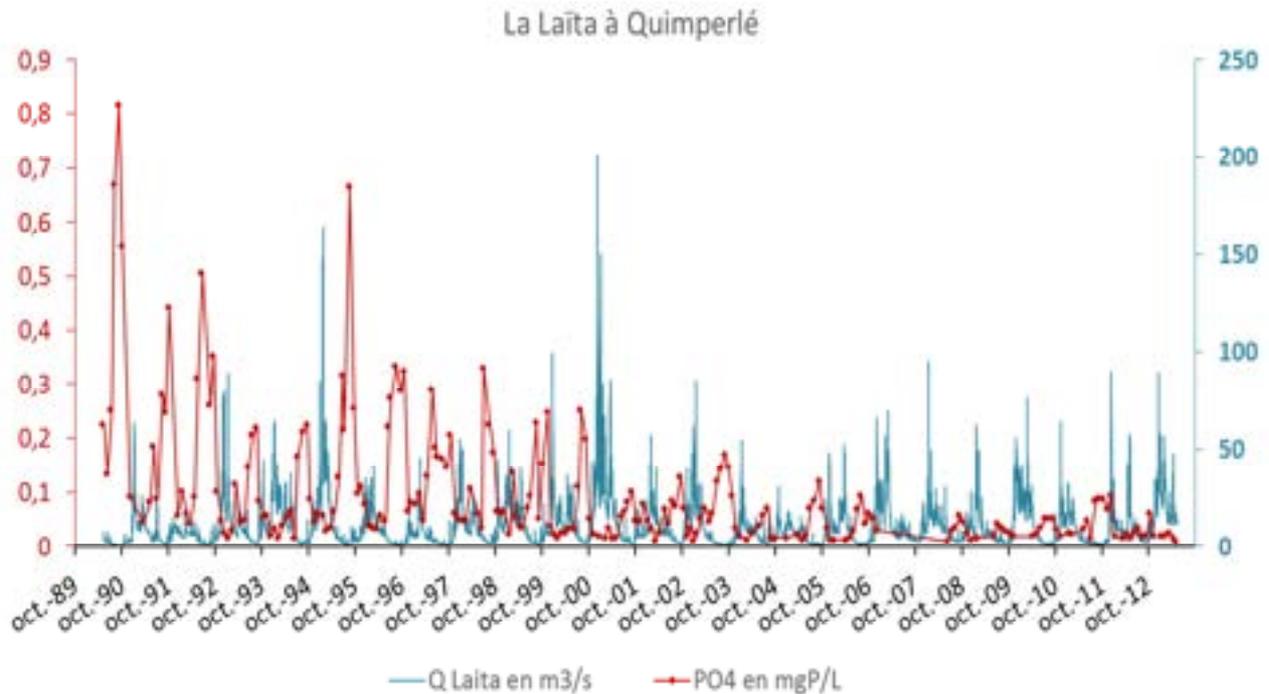


Figure 40 : Chroniques des concentrations en P_{dis} et des débits pour la Laïta à Quimperlé.

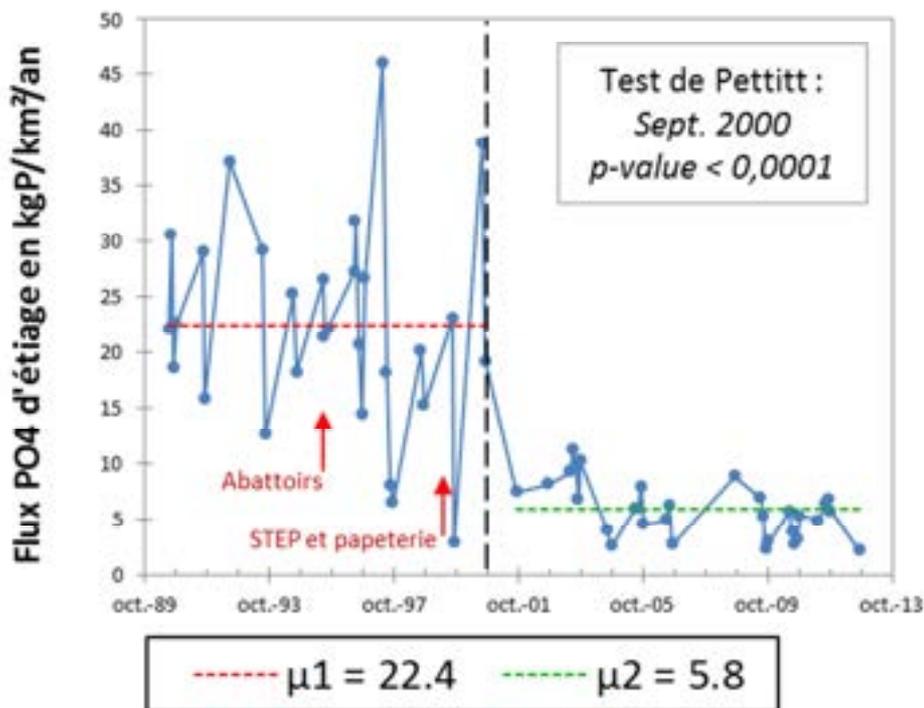


Figure 41 : Test de Pettitt appliqué à la série des flux d'étiage de P_{dis} de la rivière Laïta à Quimperlé. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 et d'accepter l'alternative H_A de non-homogénéité alors que l'hypothèse H_0 est vraie est inférieur à 0,01%. La date de rupture selon le test statistique est fixée à sept. 2000. Les flèches rouges indiquent les dates des aménagements effectués en faveur de la qualité de l'eau.

6. CONCLUSION

La présente étude a permis de collecter et de rassembler les données accumulées en Bretagne sur les concentrations en P_{tot} et P_{dis} des eaux de rivière, et stockées dans trois des principales bases de données existant au plan régional (SISE-EAUX, OSUR et ECOFLUX). La principale faiblesse de ces données est la basse fréquence des mesures, généralement mensuelle sauf dans le cas des données de la base ECOFLUX où les fréquences sont hebdomadaires, faiblesse qui rend l'analyse des flux station par station, et année par année, très incertaine du fait des fortes incertitudes pesant sur les valeurs de flux. L'intégration de toutes ces données en association avec les chroniques des stations de débit géographiquement les plus proches au sein d'une même base de données (BD COUPLE) permet de compenser partiellement cette faiblesse en regroupant les données par séries de plusieurs années hydrologiques consécutives, et en intercomparant les stations entre-elles à une échelle régionale depuis le début des chroniques en 1987. Il en ressort que des données vues au départ comme incapables de nous renseigner de manière fiable sur l'évolution dans le temps des flux de P émis par les bassins versants bretons et sur la variabilité spatiale de ces flux, sont en définitive capables de fournir une image cohérente et très probablement réaliste de ces évolutions et variabilités. Il s'agit là de la première étude jamais réalisée en Bretagne sur l'évolution dans le temps et dans l'espace de la contamination des eaux de rivières par les matières phosphorées.

Sur la base de décompositions intra-annuelles des flux de P_{tot} et de P_{dis} et de la comparaison des séries basse-fréquences des bases de données CISE-EAUX et OSUR et des séries moyenne-fréquences de la base de données ECOFLUX, plusieurs résultats importants sont obtenus sur l'évolution dans le temps des flux, la répartition spatiale passée et actuelle de ces mêmes flux et sur l'évolution dans le temps des parts respectives des émissions ponctuelles domestiques/industrielles et diffuses agricoles dans les flux globaux. Les principaux résultats sont rappelés ci-dessous.

Depuis 1997, on enregistre une diminution généralisée des flux de P_{tot} et de P_{dis} émis par les rivières de Bretagne. Exprimé en P_{tot} , le flux vers les côtes est passé en valeur moyenne annuelle de 2700 ($\pm 21\%$) tonnes à la fin des années 1990 à 1100 (+20%/-15%) tonnes par an en 2012. Ces chiffres sont sensiblement inférieurs aux estimations faites au début des années 2000 qui estimait ce flux entre 3000 à 4500 tonnes (Aurousseau ; 2001). L'export de P_{dis} a également diminué passant en moyenne annuelle sur la même période de 750 à 360 tonnes. Sur la période récente (2007-2011), le flux spécifique de P_{tot} régional moyen s'établit à 37,5 (+20%/-15%) kgP/km²/an soit environ 0,4kgP/Ha/an. Ces baisses généralisées des flux de P_{tot} et P_{dis} sont très peu liées aux variations de

débites et doivent être considérées comme traduisant avant tout des baisses nettes et fortes des émissions de P en provenance des bassins versants.

Une partie de la baisse du flux de P observée sur les 15 à 20 dernières années est imputable à la baisse des émissions domestiques et industrielles de P. En effet, les flux d'étiage pris comme indicateurs de la part de ces émissions montrent des diminutions de 60 et 70% en moyenne pour le P_{tot} et le P_{dis} sur la période. Cette diminution drastique des émissions domestiques et industrielle peut être attribuée à l'amélioration du retraitement des eaux, à l'installation de nouvelles stations d'épuration et/ou d'unité de déphosphatation ainsi qu'à l'effet positif de la législation sur le P dans les détergents. Aujourd'hui, les parts des émissions de P domestique/industrielle dans les flux totaux sont <30% et <20% dépendant que l'on considère les flux de P_{dis} ou de P_{tot} . La conséquence de ces évolutions est que les marges de progrès actuelles en matière de réduction des émissions de P en provenance du bassin versant sont principalement à rechercher du côté des émissions diffuses agricoles. Côté émissions domestiques et industrielles, l'essentiel des améliorations possibles a probablement déjà été réalisé, même si des marges de progrès demeurent pour quelques bassins encore fortement contaminés par cette source.

La diminution des émissions diffuses agricoles n'est pas un objectif inatteignable. En effet, si les émissions domestiques/industrielles ont diminué, cette diminution n'explique que partiellement la baisse des flux de P_{tot} et de P_{dis} . En très grande majorité (de 90 à 70% suivant que l'on considère le P_{part} ou le P_{dis}), les diminutions observées depuis 20 an sont liées à la diminution de la part agricole des flux. Ceci veut dire que des mesures agro-environnementales visant à limiter l'érosion des sols comme l'obligation de ne pas laisser les sols nus en hiver ou l'implantation systématique de bandes enherbées ont probablement commencées à porter leur fruit en Bretagne et que des marges de progrès existent certainement dans le domaine, surtout si en parallèle de ces mesures une gestion raisonnée des amendement en P était instituée.

Au-delà des tendances long-termes à la baisse très marquées, l'autre caractéristique des flux est de montrer de forte variabilité spatiale en amplitude avec l'échelle des 500 km² comme échelle d'homogénéisation apparente des flux. Les causes de cette variabilité ne sont pas claires. Des variations de petites longueurs d'onde dans les stocks de P du sol pourraient en être la cause, mais ceci reste à être plus amplement étayé.

Enfin, sur un plan plus méthodologique, cette étude démontre que les séries de données basse-fréquences, quoique très imparfaites de prime abord, peuvent être au final très riches d'enseignement quant à l'évolution et aux causes de la pollution des eaux par le P.

7. ANNEXES

Annexe I : Présentation de la BD COUPLE avec pour chaque couple station phosphore – station débit, le code qualifiant le couplage, l’aire drainée par la station phosphore en km², l’aire drainée par la station débit en km², la période de fonctionnement de la station phosphore, et les fréquences annuelles de mesures pour P_{dissous} (Pd) et P_{tot} en mesures/an. Annexes A. 1 et A. 2 pp. 93-94

Annexe II : Résultats bruts des calculs pour chaque couple station phosphore – station débit :

- Calcul des valeurs M2% et W2% exprimées en %.
Annexes A. 3 et A. 4 pp.95-96.
- Calcul des flux globaux annuels de P_{tot} et P_{dis} exprimés en kgP/km²/an.
Annexes A. 5 et A. 6 pp. 97-98.
- Calcul des flux de P_{tot} et P_{dis} d’étéage propagés sur l’année exprimés en kgP/km²/an.
Annexes A. 7 et A. 8 pp 99-100

Annexe III : Abaques de calcul des incertitudes (Table II) reproduit d’après Moatar et al. (2012) et abaqués d’aide au choix des méthodes de calcul de flux (Table 3) en fonction des indicateurs b50_{sup} et W_{2%} reproduit d’après Raymond et al. (2013). Ces abaqués ont été utilisés dans le choix de la méthode de calcul des flux, et dans le calcul des incertitudes dans le cas de la méthode DWC à partir de l’indicateur M_{2%}. Annexe A. 9 pp.101.

A. 1

N°	Code Station P	Nom de la station P	Nom de la station Q	Couplage débit - concentration	Aire km²		Année		Fréq. Moy	
					P	Débit	Début	Fin	Pd	Ptot
1	11	Le Dourduff à Plouezoch	Le Dourduff à Garland	A2	68,49	43,55	1998	2012	45,81	-
2	12	Le Dossen à Morlaix	Le Queffleuth à Plourin-les-Morlaix [Les Trois Chenes]	B3	191,4	95,32	1998	2012	40,37	-
3	13	La Penzé à Taule	La Penze à Taule [Penhoat]	A1	145,8	145,9	1998	2012	34,99	-
4	14	Le Guillec à Sibiril	Le Guillec à Trezilide	A3	74,37	44,44	1998	2012	33,56	-
5	17	L'Elorn à Landerneau	L'Elorn à Plouedern	A1	278,4	261,2	1998	2012	46,28	-
6	18	La Douffine à Pont Neuf	La Douffine à Saint-Segal	A1	157,8	137,9	1998	2012	42,66	-
7	19	L'Aulne à Châteaulin	L'Aulne à Gouezec [Pont-Coblant]	A1	1476	1389	1998	2012	44,71	-
8	23	Le Saint Laurent à La Forêt Fouesnant	Le Moros à Concarneau [PONT D22]	B2	29,92	20,72	1998	2012	40,25	-
9	4161600	NANCON à FOUGERES	Le Nancon à Lecousse [Pont aux Anes]	A1	67,82	64,57	1999	2008	12,33	12,43
10	4162000	COUESNON à MEZIERES-SUR-COUESNON	Le Couesnon à Romazy	A2	372,6	518	1971	2013	5,01	11,97
11	4162160	MINETTE à SAINT-HILAIRE-DES-LANDES	La Loysance à Saint-Ouen-la-Rouerie	B3	58,46	82,7	2010	2013	11,83	11,83
12	4162200	MINETTE à SAINT-CHRISTOPHE-DE-VALAINS	La Loysance à Saint-Ouen-la-Rouerie	B1	80,15	82,7	2002	2013	12,08	12,08
13	4162300	COUESNON à ROMAZY	Le Couesnon à Romazy	A1	518,3	518	2007	2013	11,38	11,38
14	4162900	COUESNON à ANTRAIN	Le Couesnon à Romazy	A2	685,4	518	1999	2006	11,86	11,73
15	4162930	LOISANCE à ANTRAIN	La Loysance à Saint-Ouen-la-Rouerie	A2	113,4	82,7	2002	2006	12,22	12,22
16	4162958	LOISANCE à SAINT-OUEN-LA-ROUERIE	La Loysance à Saint-Ouen-la-Rouerie	A1	82,81	82,7	2007	2013	11,37	11,37
17	4163000	COUESNON à SOUGEAL (ANTRAIN)	Le Couesnon à Romazy	A2	806,5	518	1976	2013	11,22	16,06
18	4163500	GUYOULT à MONT-DOL	Le Guyoult à Epiniac	A3	104,5	62,33	1999	2013	11,91	11,91
19	4163550	CARDEQUIN à VIVIER-SUR-MER	Le Guyoult à Epiniac	B4	224,5	62,33	1999	2013	11,90	11,90
20	4164800	RANCE à SAINT-JOUAN-DE-L'ISLE	La Rance à Saint-Jouan-de-l'Isle	A1	143,9	144	1994	2013	11,99	11,99
21	4164850	RANCE à CAULNES	La Rance à Saint-Jouan-de-l'Isle	A2	192,5	144	1987	2013	11,06	11,13
22	4164870	FREMEUR à CAULNES	La Rance à Saint-Jouan-de-l'Isle	B5	76,01	144	2009	2013	11,78	11,78
23	4164950	NEAL à MEDREAC	Le Neal à Medreac	A3	56,73	84,29	1999	2013	12,07	12,07
24	4165050	RANCE à GUENROC	La Rance à Guenroc [Rophemel]	A1	377,7	373,6	1997	2013	12,04	12,04
25	4165200	RANCE à SAINT-ANDRE-DES-EAUX	La Rance à Guenroc [Rophemel]	A2	529,2	373,6	1997	2013	11,98	11,98
26	4165700	LINON à LA CHAPELLE-AUX-FILTZMEENS	Le Neal à Medreac	B1	74,34	84,29	1999	2013	12,10	12,10
27	4166050	RANCE à TADEN	La Rance à Guenroc [Rophemel]	A3	920,4	373,6	1999	2006	12,19	12,19
28	4166100	RANCE à DINAN	La Rance à Guenroc [Rophemel]	A4	941,2	373,6	2002	2007	12,16	12,16
29	4166300	FREMUR à PLEURTUIT	Le Fremur à Pleslin-Trigavou	A2	54,01	36,46	1999	2009	12,01	12,01
30	4166800	ROSETTE à MEGRIT	La Rosette à Megrit	A1	113	113	1994	2013	12,35	12,35
31	4166900	ROSETTE à JUGON-LES-LACS	La Rosette à Megrit	A3	210,2	113	1996	2013	12,57	12,57
32	4166950	QUILLOURY à PLENEE-JUGON	Le Quilloury [Quilloury] à Plenee-Jugon [La Salle es Pie]	A1	33,06	36,59	1997	2013	11,95	11,95
33	4167000	ARGUENON à JUGON-LES-LACS	La Rosette à Megrit	B1	103,3	113	1976	2013	8,99	10,48
34	4167010	ARGUENON à JUGON-LES-LACS	La Rosette à Megrit	B4	317,7	113	1994	2013	12,60	12,60
35	4167050	RAU DE L'ETANG DU GUILLIER à JUGON-LES-LACS	Le Quilloury [Quilloury] à Plenee-Jugon [La Salle es Pie]	B4	21,82	36,59	1997	2013	11,71	11,71
36	4167100	ARGUENON à PLEVEN	L'Arguenon à Jugon-les-Lacs	A4	388	104	1994	2013	12,39	12,39
37	4167600	FREMUR HENANBIHEN à PLEBOULLE	Le Fremur à Pleslin-Trigavou	A3	67,42	36,46	1997	2013	11,53	11,53
38	4168140	GOUSSANT à COETMIEUX	Le Gouessant à Andel	A1	244,7	242,8	1987	2013	10,95	10,98
39	4168210	EVRON à COETMIEUX	L'Evron à Coetmieux	A1	138,5	138,6	1994	2013	12,37	12,27
40	4168250	URNE à PLEDTRAN	L'Urne à Pledran	A1	46,74	46,74	1994	2013	11,95	11,95
41	4170000	GOUET à LE FOEIL	Le Gouet à Saint-Julien	A3	92,03	135,4	1971	2013	5,02	12,02
42	4170500	GOUET à SAINT-JULIEN	Le Gouet à Saint-Julien	A1	135,4	135,4	1987	2013	11,97	12,00
43	4170700	MAUDOUVE à SAINT-DONAN	La Maudouve à Saint-Donan	A1	27,83	29,64	1994	2013	12,47	12,47
44	4171000	GOUET à LA MEAUGON	Le Gouet à Saint-Julien	A2	173,8	135,4	1971	1985	2,68	7,05
45	4171010	GOUET à PLOUFRAGAN	Le Gouet à Ploufragan [St-Barthelemy]	A1	195,5	194,5	1994	2013	12,79	12,79
46	4171050	IC à BINIC	Le Gouet à Saint-Julien	B4	78,59	135,4	1997	2013	11,56	11,56
47	4171300	LEFF à BOQUEHO	Le Leff à Boqueho	A1	42,18	42,24	1995	2013	11,47	11,47
48	4171400	LEFF à GOMMENECH	Le Leff à Quemper-Guezennec	A4	204,4	340,8	1997	2013	12,06	12,06
49	4171450	LEFF à YVIAS	Le Leff à Quemper-Guezennec	A1	340,8	340,8	1990	2013	10,32	10,32
50	4171750	TRIEUX à SAINT-PEVER	Le Trieux à Saint-Pever	A4	112,7	183	1984	2013	7,02	7,02
51	4171860	TRIEUX à GRACES	Le Trieux à Saint-Pever	A2	282	183	2009	2013	12,26	12,26
52	4171870	TRIEUX à GUINGAMP	Le Trieux à Saint-Pever	A2	285	183	1997	2013	12,06	12,06
53	4172030	TRIEUX à SQUIFFIEC	Le Trieux à Saint-Clet [Moulin-de-Chateaulin]	A1	387	414,2	1987	2013	11,83	11,83
54	4172060	TRIEUX à PLOUEC-DU-TRIEUX	Le Trieux à Saint-Clet [Moulin-de-Chateaulin]	A1	412,5	414,2	2007	2013	24,24	24,24
55	4172070	TRIEUX à SAINT-CLET	Le Trieux à Saint-Pever	A3	414,2	183	1994	2007	12,02	12,02
56	4172370	JAUDY à MANTALLOT	Le Jaudy à Mantallot	A1	165,4	165,7	1990	2013	9,94	9,94
57	4172570	GUINDY à PLOUGUIEL	Le Guindy à Plouguiel	A1	120,9	120,9	1990	2013	9,98	9,98
58	4172620	GUIC à GRACES	Le Guic à Guerlesquin [Trogredecc]	A2	17,93	13,24	1997	2013	11,93	12,05
59	4172890	GUIC à BELLE-ISLE-EN-TERRE	Le Guic à Guerlesquin [Trogredecc]	A5	171,9	13,24	1990	2013	9,89	9,89
60	4172950	LEGUER à BELLE-ISLE-EN-TERRE	Le Leguer à Belle-Isle-en-Terre	A1	270,1	269,6	1997	2013	12,05	12,05
61	4173000	LEGUER à LE VIEUX-MARCHE	Le Leguer à Pluzenet	A1	358,6	358,6	1976	2013	2,30	12,21
62	4173083	LEGUER à PLOUBEZRE	Le Leguer à Pluzenet	A1	377,1	358,6	2005	2013	5,23	5,23
63	4173100	LEGUER à PLOUBEZRE	Le Leguer à Pluzenet	A1	387,2	358,6	1987	2013	12,52	12,52
64	4173705	DOURON à PLOUEGAT-MOYSAN	Le Douron au Ponthou	A1	29,09	29,09	2005	2008	9,36	9,36
65	4173710	DOURON à PANTHOU (LE)	Le Douron au Ponthou	A3	48,54	29,09	2005	2008	8,74	8,74
66	4173720	DOURON (LE) à PLOUEGAT-GERRAND	Le Douron au Ponthou	A4	94,19	29,09	2009	2013	12,30	12,30
67	4173737	DOURDUFF à GARLAN	Le Jarlot à Plougouven	B1	43,55	43,57	2005	2013	12,18	12,18
68	4173740	DOURDUFF à PLOUEZOCH	Le Jarlot à Plougouven	B2	71,18	43,57	1978	1984	11,05	-
69	4174000	JARLOT à PLOURIN-LES-MORLAIX	Le Jarlot à Plougouven	A1	42,55	43,57	1971	2013	1,67	7,01
70	4174130	JARLOT à MORLAIX	Le Jarlot à Plougouven	A3	86,31	43,57	1978	1984	10,82	-
71	4174250	QUEFFLEUTH à MORLAIX	Le Queffleuth à Plourin-les-Morlaix [Les Trois Chenes]	A1	95,26	95,32	1987	2013	11,02	10,98
72	4174365	PENZE à SAINT-THEGONNEC	Le Queffleuth à Plourin-les-Morlaix [Lesquifiou]	B2	69,87	85,08	1982	1984	11,28	-
73	4174480	PENZE à TAULE	Le Queffleuth à Plourin-les-Morlaix [Les Trois Chenes]	B2	145,8	95,32	2009	2013	12,21	12,21
74	4174520	HORN à MESPALU	L'Horn à Mespaul [Kertanguy]	A1	30,18	35,55	2005	2013	11,55	11,55
75	4174540	HORN à PLOUENAN	L'Horn à Mespaul [Pont Milin]	A1	50,03	50,01	1978	2008	12,57	14,52
76	4174550	HORN à SAINT-POL-DE-LEON	L'Horn à Mespaul [Pont Milin]	A2	71,42	50,01	2009	2013	12,30	12,30
77	4174660	GUILLEC à TREZILIDE	L'Horn à Mespaul [Pont Milin]	B1	44,47	50,01	2005	2013	12,17	12,17
78	4174670	GUILLEC à PLOUGOULM	L'Horn à Mespaul [Pont Milin]	B2	71,35	50,01	2009	2013	12,30	12,30
79	4174940	ABER WRACH à DRENNEC (LE)	L'Aber Wrac'h au Drennecc	A1	24,92	24,99	2005	2006	12,65	12,65
80	4175100	ABER WRACH à LANARVILY	L'Aber Wrac'h au Drennecc	A4	75,62	24,99	1990	2013	9,97	9,97
81	4175120	ABER WRACH à LOC-BREVALAIRE	L'Aber Wrac'h au Drennecc	A4	77,32	24,99	2009	2013	12,08	12,08
82	4175180	ABER WRACH à KERNILIS	L'Aber Wrac'h à Ploudaniel [Roch-Huez]	A3	82,82	37,37	1978	1984	12,62	-
83	4175450	ABER BENOIT à PLABENNEC	L'Aber-Benoit à Plabennec [Loc Maria]	A1	27,05	27,05	2005	2013	12,19	12,19
84	4175500	ABER BENOIT à PLOUVIEN	L'Aber-Benoit à Plabennec [Loc Maria]	A3	65,58	27,05	2009	2013	12,30	12,30
85	4176000	ABER BENOIT à LANNILIS	L'Aber-Benoit à Plabennec [Loc Maria]	B3	53,82	27,05	1976	2013	12,13	12,16
86	4176480	GARO à PLOUGUIN	L'Aber-Benoit à Plabennec [Loc Maria]	B3	50,35	27,05	2007	2013	12,16	12,16
87	4177050	ABER ILDUT à PLOUARZEL	L'Aber Ildut à Breles [keringar]	A1	89,95	89,95	2005	2013	10,93	10,93
88	4177900	ELORN à LA ROCHE-MAURICE	L'Elorn à Ploudiry [Kerfaven]	A1	226,6	201,5	1977	1984	9,70	-
89	4178000	ELORN à PLOUEDERN	L'Elorn à Plouedern	A1	260,3	261,2	1971	2013	7,84	12,01
90	4178103	MIGNONNE à IRVILLAC	La Mignonne à Irvillac	A1	66,28	66,27	2005	2013	11,57	11,57
91	4178127	DOUFFINE à SAINT-SEGAL	La Douffine à Saint-Segal	A1	137,9	137,9	2005	2013	11,30	11,43
92	4178330	AULNE à SCRIGNAC	L'Aulne à Scrignac [Le Goask]	A1	117,1	117,1	2005	2008	9,40	9,40
93	4178455	AULNE à LOC-MARIA-BERRIEN	L'Aulne à Scrignac [Le Goask]	A4	315,6	117,1	2005	2013	11,45	11,45
94	4178486	ELLEZ à BRENNILIS	L'Ellez à Brennilis	A1	34,97	34,97	2005	2013	11,57	11,57
95	4178490	ELLEZ à COLLOREC	L'Ellez à Brennilis	A4	110,3	34,97	2010	2013	12,38	12,38
96	4178650	AULNE à LANDELEAU	L'Aulne à Kergloff [Pont-de-Penity]	A1	502	487,1	1987	2013	10,74	10,74
97	4178950	HYERE à CARHAIX-POUGUER	L'Hyerès à Trebrivan	A1	304,7	258,5	1980	1984	8,82	-

A. 2

N°	Code Station P	Nom de la station P	Nom de la station Q	Couplage débit - concentration	Aire km ²		Année		Fréq. Moy	
					P	Débit	Début	Fin	Pd	Ptot
98	4179000	HYERE à CARHAIX-PLOUGUER	L'Hyeres a Trebrivan	A2	351,6	258,5	1971	2013	5,85	9,32
99	4179270	AULNE à CHATEAUNEUF-DU-FAOU	L'Aulne à Chateaneuf-du-Faou [Pont Pol ty Glass]	A1	1174	1223	1980	1984	9,84	-
100	4179300	AULNE à CHATEAUNEUF-DU-FAOU	L'Aulne à Gouezec [Pont-Coblant]	A1	1223	1389	2009	2013	12,32	12,32
101	4179500	AULNE à CHATEAULIN	L'Aulne à Chateaneuf-du-Faou [Pont Pol ty Glass]	A1	1458	1223	1980	2013	19,85	19,13
102	4179530	AULNE à SAINT-SEGAL	L'Aulne à Gouezec [Pont-Coblant]	A1	1492	1389	2008	2013	11,49	11,49
103	4180100	GOYEN à PONT-CROIX	Le Goyen a Pont-Croix [Kermaria]	A1	87,93	87,93	1980	2013	4,35	12,00
104	4180900	R DE PONT L'ABBE à PLONEOUR-LANVERN	La Riviere de Pont-l'Abbe a Ploneour-Lanvern [Tremillec]	A1	42,86	42,99	2005	2013	12,13	12,13
105	4181960	JET à ELLIANT	Le Jet à Ergue-Gaberic	A1	33,5	26,92	2005	2013	11,34	11,34
106	4182000	ODET à QUIMPER	L'Odete a Ergue-Gaberic [Treodet]	A1	213,5	213,5	1971	2013	5,08	12,12
107	4182500	JET à ERGUE-GABERIC	Le Jet à Ergue-Gaberic	A4	110	26,92	2005	2008	9,24	9,24
108	4182990	STEIR à GUENGAT	Le Steir a Guengat	A1	192,6	192,5	2005	2013	10,88	10,88
109	4183000	STEIR à QUIMPER	Le Steir a Guengat	A1	198	192,5	1976	1983	4,64	-
110	4184195	MOROS à CONCARNEAU	Le Moros a Concarneau [PONT D22]	A1	20,72	20,72	2005	2013	11,94	11,94
111	4184700	STER GOZ à BANNALEC	Le Ster Goz a Bannalec	A3	49,46	71,13	1980	1984	9,34	-
112	4184830	STER GOZ à BANNALEC	Le Ster Goz a Bannalec	A1	71,13	71,13	2005	2013	11,33	11,33
113	4184950	AVEN à SAINT-AVEN	L'Aven a Pont-Aven [voie express]	A1	173,6	166	2007	2013	12,03	12,03
114	4185000	AVEN à RIEC-SUR-BELON	L'Aven a Pont-Aven [Bois d'Amour]	A1	184,1	184,1	1976	1984	6,95	-
115	4185500	AVEN à PONT-AVEN	L'Aven a Pont-Aven [voie express]	A1	184,2	166	1988	2006	8,60	8,60
116	4186700	ISOLE à SAINT-THURIEN	L'Isola a Quimperle [Place Bremont d'Ars]	A2	156,8	215,8	1988	2013	7,34	7,34
117	4187010	ISOLE à QUIMPERLE	L'Isola a Quimperle [Place Bremont d'Ars]	A1	213,6	215,8	1980	1984	10,30	-
118	4187525	ELLE à FAOUEU (LE)	L'Elle au Faouet	A3	258	122,2	2005	2013	11,45	11,45
119	4188000	ELLE à ARZANO	L'Elle a Arzano [Pont Ty Nadan]	A1	578,6	579,2	1976	2013	6,58	9,47
120	4188500	ELLE à QUIMPERLE	L'Elle a Arzano [Pont Ty Nadan]	A1	604,1	579,2	1980	1984	9,31	-
121	4189000	LAITA à QUIMPERLE	La Laita a Quimperle	A5	843,2	843,1	1971	1987	8,29	10,73
122	4189200	LAITA à QUIMPERLE	L'Elle a Arzano [Pont Ty Nadan]	A2	854,4	579,2	1990	2013	11,44	11,44
123	4190000	SCORFF à ARZANO	Le Scorf a Plouay [Pont Kerlo]	A1	299,3	299,3	1971	2013	6,13	9,47
124	4190550	SCORFF à PONT-SCORFF	Le Scorf a Plouay [Pont Kerlo]	A2	375,2	299,3	1988	2013	9,99	9,96
125	4190660	BLAVET à PEUMERIT-QUINTIN	Le Blavet a Kerien [Kerlouet]	A3	45,91	19,12	1997	2013	12,08	12,08
126	4190670	RAU DE L'ETANG DU LOCH à PEUMERIT-QUINTIN	Le Blavet a Kerien [Kerlouet]	B1	17,9	19,12	1997	2013	12,08	12,08
127	4190690	DOURDU à LANRIVAIN	Le Lestolet a Kerien	B1	11,95	13,23	1997	2013	12,08	12,08
128	4190700	BLAVET à TREMARGAT	Le Blavet a Lanrivain	A1	87,04	87,22	1994	2013	12,49	12,49
129	4190720	BLAVET à LANRIVAIN	Le Blavet a Lanrivain	A2	110,5	87,22	1997	2013	11,53	11,53
130	4190750	BLAVET à SAINTE-TREPHINE	Le Blavet a Lanrivain	A3	201,2	87,22	1997	2013	12,08	12,08
131	4190770	SULON à SAINT-NICOLAS-DU-PELEM	Le Blavet a Lanrivain	B3	54,86	87,22	1997	2013	8,23	8,23
132	4190780	SULON à SAINTE-TREPHINE	Le Sulon a Sainte-Trephine	A1	119,4	119,4	1997	2013	12,08	12,08
133	4190850	BLAVET à PERRET	Le Blavet a Mur-de-Bretagne [Guerledan]	A1	565,5	674,9	1987	2013	12,05	12,01
134	4191410	BLAVET à NEULLIAC	Le Blavet a Neulliac [Le Porzo]	A1	874,8	884,8	2007	2013	11,44	11,44
135	4191900	BLAVET à PONTIVY	Le Blavet a Neulliac [Le Porzo]	A1	912,3	884,8	2002	2006	12,24	12,24
136	4192100	BLAVET à LE SOURN	Le Blavet a Neulliac [Le Porzo]	A1	1025	884,8	1987	2013	10,93	10,93
137	4192800	EVEL à BAUD	L'Evel a Guenin	A2	478,7	314,5	2003	2013	11,79	11,79
138	4192830	EVEL à GUENIN	L'Evel a Guenin	A1	314,5	314,5	2005	2013	11,45	11,45
139	4193000	EVEL à BAUD	L'Evel a Guenin	A2	449,4	314,5	1976	2006	5,42	8,60
140	4193800	RAU DU MOULIN DE TALLENE ou COET-ORGAN à QUISTINIC	Le Coet-Organ a Quistinic [Kerdec]	A1	45,8	45,84	2005	2013	11,73	11,73
141	4194000	BLAVET à LANGUIDIC	Le Blavet a Languidic [Quellenec]	A1	1936	1948	1976	2013	16,45	18,15
142	4195000	R D'AURAY ou LOC'H à BRECH	Le Loch a Brech	A1	182,8	182,8	1976	2013	6,61	9,51
143	4195400	OUST à SAINT-MARTIN-DES-PRES	L'Oust a Saint-Martin-des-Pres	A1	28,66	28,71	1994	2013	11,21	11,26
144	4195700	OUST à HEMONSTOIR	L'Oust a Hemonstoir [PONT D691]	A1	236,4	253,6	1994	2013	12,01	12,01
145	4196008	LIE à PLUMIEUX	Le Lie a la Preussaye	A2	374	280,2	2007	2013	11,49	11,49
146	4196449	OUST à PLEUGRIFFET	L'Oust a Pleugriffet [La Tertraie]	A1	928,6	930,4	2005	2013	11,99	11,99
147	4197700	OUST à QUILLY	L'Oust a Pleugriffet [La Tertraie]	A1	1137	930,4	2003	2013	11,79	11,79
148	4199200	OUST à SAINT-MARTIN	L'Oust a Pleugriffet [La Tertraie]	A4	244,1	930,4	1979	2013	11,74	11,74
149	4199401	AFF à GUER	L'Aff a Paimpont	A5	171,3	29	2009	2013	11,13	11,35
150	4199490	AFF à QUELNEUC	L'Aff a Quelneuc	A1	349,9	349,9	2005	2013	11,43	11,43
151	4199630	AFF à SIXT-SUR-AFF	L'Aff a Quelneuc	A2	564,8	349,9	1999	2006	12,16	12,16
152	4199865	ARZ à MOLAC	L'Arz a Molac	A1	164,1	163,9	2005	2013	11,31	11,31
153	4201000	VILAINE à VITRE	La Vilaine a Vitre	A1	139,8	136,2	1976	2013	7,76	11,01
154	4201051	VALIERE à ERBREE	La Valiere a Bourgon	B4	30,6	6,64	2005	2013	12,09	12,09
155	4201170	VALIERE à POCE-LES-BOIS	La Valiere a Argentre-du-Plessis	A3	160,4	66,45	2002	2013	12,08	12,08
156	4201990	VILAINE à CHATEAUBOURG	La Vilaine a Chateaubourg	A1	556	556	1999	2013	11,92	11,92
157	4204000	VEUVRE ou CHEVRE à LA BOUEXIERE	Le Chevre a la Bouexiere	A1	149,2	151,3	1976	2013	4,92	12,57
158	4204300	VILAINE à CESSON-SEVIGNE	La Vilaine a Cesson-Sevigne [Sevigne]	A1	848,3	848,3	1997	2013	11,94	11,94
159	4205500	ILLE à MONTREUIL-SUR-ILLE	L'Ille a Montreuil-sur-Ille	A1	93,57	99	1999	2013	11,73	11,66
160	4205620	ILLET à CHASSE-SUR-ILLET	L'Illet a Chasse-sur-Illet	A1	110,4	110,4	1999	2013	12,10	12,10
161	4207000	VILAINE à RENNES	La Vilaine a Cesson-Sevigne [Cesson]	A3	1530	880,1	1971	2013	9,97	11,44
162	4208350	MEU à IFFENDIC	Le Meu a Montfort-sur-Meu [L'Abbaye]	A3	321,5	472,8	2002	2013	12,08	12,08
163	4209000	MEU à MORDELLES	Le Meu a Montfort-sur-Meu [L'Abbaye]	A2	764,5	472,8	1971	2013	6,27	9,81
164	4209100	MEU à CHAVAGNE	Le Meu a Montfort-sur-Meu [L'Abbaye]	A3	801,8	472,8	2002	2013	12,08	12,08
165	4209990	VILAINE à GUICHEN	La Vilaine a Guichen [Le Boel]	A2	245,1	327,9	1999	2013	11,83	11,83
166	4211000	SEICHE à BRUZ	La Seiche a Bruz [Carce]	A1	786,4	807,7	1971	2013	9,14	10,70
167	4211550	CANUT (NORD) à LASSY	Le Canut Nord a Maxent	A4	88,41	25,14	2005	2013	11,44	11,44
168	4212700	SEMNON à PLECHATTEL	Le Semnon a Bain-de-Bretagne	A1	482,9	404,3	1989	2013	9,35	9,35
169	4212800	VILAINE à PLECHATTEL	La Vilaine a Guichen [Le Boel]	A1	4028	327,9	1999	2013	11,99	11,99
170	4213000	VILAINE à GUIPRY	La Vilaine a Guipry [Malon]	A1	4120	4120	1976	2013	10,11	11,77
171	4214295	ARON à GRAND-FOUGERAY	L'Aron a Grand-Fougeray [Bernardais]	A1	110,3	112,4	2007	2013	11,37	11,37
172	4214500	VILAINE à LANGON	La Vilaine a Guipry [Malon]	A1	4768	4120	1999	2013	12,06	12,06
173	4215195	AFF à BAINS-SUR-OUST	L'Aff a Quelneuc	A3	727,4	349,9	2009	2013	11,35	11,35
174	4215520	CANUT SUD à SIXT-SUR-AFF	Le Canut Sud a Saint-Just	A2	65,68	39,93	2009	2013	11,35	11,35
175	4215750	VILAINE à SAINTE-MARIE	La Vilaine a Guipry [Malon]	A2	566,1	4120	1997	2013	11,87	11,87
176	4216000	VILAINE à RIEUX	La Vilaine a Rieux	A1	9685	9685	1971	2013	15,55	18,78
177	4310002	FREMUR à PLEURTUIT	Le Fremur a Pleslin-Trigavou	A2	54,1	36,46	2010	2013	12,27	12,27
178	22000050	LE LEGUER à PLOUBEZRE	Le Guindy a Plouguiel	A1	392,1	120,9	1991	2003	2,77	22,89
179	22000067	LE LIE à PLEMET	Le Lie a la Preussaye	A1	311,9	280,2	1991	2003	4,99	22,90
180	22000109	LE TRIEUX à SAINT-CLET	Le Trieux a Saint-Clet [Moulin-de-Chateaulin]	A1	414	414,2	1991	2003	1,77	23,23
181	22000152	LE LEFF à LANNEBERT	Le Leff a Boqueho	A4	219,2	42,24	1991	2003	1,76	23,19
182	22000152	LE LEFF à LANNEBERT	Le Leff a Quemper-Guezennec	A4	219,2	340,8	1991	2003	1,76	23,19
183	22000183	LE TRIEUX à GRACES	Le Trieux a Saint-Pever	A2	282	183	1991	2003	2,75	23,04
184	22000411	LE LEFF à YVIAS	Le Leff a Quemper-Guezennec	A1	333	340,8	1991	2003	2,76	23,10
185	22000694	L'URNE à TREGUEUX	L'Urne a Pledran	A1	47,4	46,74	1991	2003	2,55	22,31
186	22000705	L'IC à BINIC	Le Gouet a Saint-Julien	B4	80,93	135,4	1992	2003	2,64	23,15
187	22000729	LE LEGUER à PLOUNEVEZ-MOEDEC	Le Leguer a Belle-Isle-en-Terre	A1	285,2	269,6	1991	2003	2,54	23,06
188	22000762	LE LEGUER à LANNION	Le Leguer a Pluzunet	A1	395,9	358,6	1991	2003	2,77	22,89
189	29000079	L'HORN à PLOUENAN	L'Horn a Mespaul [Pont Milin]	A1	46,65	50,01	-	-	-	6,82
190	29000614	L'ELORN à PLOUEDERN	L'Elorn a Plouedern	A1	260,9	261,2	2000	2000	-	11,17
191	56000169	LE BLAVET à BAUD	Le Blavet a Neulliac [Le Porzo]	A2	1348	884,8	-	-	-	7,27
192	56000182	LA CLAIÉ à SAINT-CONGARD	L'Oust a Saint-Grave [Le Guelin]	A1	2429	2442	-	-	-	7,67
193	56000239	L'ELLE à LE FAOUEU	L'Elle au Faouet	A1	118,8	122,2	-	-	-	5,36
194	56000260	LE BLAVET à CLEGUEREC	Le Blavet a Lanrivain	A2	64,77	87,22	-	-	-	4,40
195	56000276	LE BLAVET à PONTIVY	Le Blavet a Neulliac [Le Porzo]	A1	915,8	884,8	-	-	-	6,21

A. 3

N°	Code Station P	W2%					M2% Pdisous					M2% Ptot				
		2007-2011	2002-2006	1997-2001	1992-1996	1987-1991	2007-2011	2002-2006	1997-2001	1992-1996	1987-1991	2007-2011	2002-2006	1997-2001	1992-1996	1987-1991
1	11	10,86	9,61	11,31			20,99	9,34	10,78							
2	12	9,14	8,66	10,37			2,00	2,00	3,18							
3	13	9,44	8,39	8,54			6,77	2,00	2,00							
4	14	8,53	8,04	9,36			14,15	3,21	6,97							
5	17	11,25	10,15	10,60			15,03	11,00	4,12							
6	18	14,21	12,73	14,38			2,00	2,00	2,00							
7	19	13,03		13,89			17,36		12,33							
8	23	8,55	9,72	11,37			26,46	16,99	9,24							
9	4161600		8,15					15,12					20,88			
10	4162000	12,15	12,26	12,27			14,41	17,86	6,55			18,63	24,19	13,04		
11	4162160															
12	4162200	8,16	7,99				14,87	19,46				14,92	27,96			
13	4162300	12,15										26,33				
14	4162900		12,26					21,72					32,05			
15	4162930		7,99					8,35					19,63			
16	4162958	8,16					13,41					29,98				
17	4163000	12,15	12,26	12,27			13,80	21,15	11,34			24,05	22,19	17,62		
18	4163500	13,50	11,06					14,62				25,01	20,67			
19	4163550	13,50	11,06				16,59	13,92				12,14	12,11			
20	4164800	18,55	16,68	19,88				22,50				37,05	37,78	45,75		
21	4164850	18,55	16,68	19,88	19,43			30,95	27,57	24,80		27,72	29,41	29,74	24,69	
22	4164870															
23	4164950	27,38	19,56				32,32	24,07				30,31	26,39			
24	4165050		18,89	21,76								29,50	33,02			
25	4165200		18,89	21,76				26,41	24,44					30,84		
26	4165700	27,38	19,56				27,01	20,28				28,97	20,35			
27	4166050		18,89										20,05			
28	4166100		18,89										21,11			
29	4166300		15,95										23,11			
30	4166800	16,93	13,15	16,14				11,34	12,59			21,17	11,24	15,14		
31	4166900	16,93	13,15	16,14								25,80	17,61	20,12		
32	4166950	15,17	12,03					22,31				21,73	28,12			
33	4167000	16,93	13,15	16,14	14,57		21,58	22,29	14,54	18,89		28,58		20,55	20,46	
34	4167010	16,93	13,15	16,14					21,15			26,71	20,56	20,24		
35	4167050	15,17	12,03				19,66	22,48				19,19	29,48			
36	4167100	17,55		18,54								28,32		29,37		
37	4167600	18,69	15,95	18,48			25,45	16,81	25,25			27,30	23,28	28,08		
38	4168140	21,81	16,36	20,43	19,85		27,88	32,80	26,67	19,07		27,45	23,05	27,28	22,59	
39	4168210	17,98	13,21	17,46			19,45	4,50	22,43			29,33	11,20	29,67		
40	4168250	12,18	11,03	14,11			10,97	3,57	5,73			17,15	12,59	22,64		
41	4170000	11,20	9,35	11,06			16,11	5,19	11,23			23,09	16,10	15,81		
42	4170500	11,20	9,35	11,06	12,32	17,64	14,18	14,52	9,77	6,00	19,08	25,86	10,09	17,79	16,08	
43	4170700	12,87	10,32					8,78	4,58			12,24	9,45			
44	4171000															
45	4171010		11,01	12,49				14,18	17,32					21,45		
46	4171050	11,20	9,35	11,06			10,94	12,07	18,47			7,37	18,68	24,87		
47	4171300	11,50	11,59	13,83			20,17	14,47				26,58	17,38	30,16		
48	4171400	14,20	11,87	15,32			15,51	16,19	17,48			22,75	28,21	26,29		
49	4171450	14,20	11,87	15,32				22,03	20,29			20,37	21,48	22,99		
50	4171750	11,20	8,25	11,27			9,32	9,27				24,20	4,65	21,33		
51	4171860															
52	4171870	11,20	8,25	11,27			8,02	7,97	14,14			23,05	3,42	17,60		
53	4172030	11,63	9,72	11,83	13,19			6,58	17,11	3,27		11,98	12,96	15,88	10,24	
54	4172060	11,63					4,55					16,56				
55	4172070		8,25	11,27				2,00	5,28				10,67	19,77		
56	4172370	13,70	12,76	16,86			22,54	20,71	17,28			25,94	26,76	19,74		
57	4172570	8,90	8,24	9,31			16,51	22,83	12,04			25,45	24,72	13,98		
58	4172620	11,94	12,13	13,16								5,71	3,40	13,72		
59	4172890	11,94	12,13	13,16					19,73			19,57	20,10	11,50		
60	4172950	11,01	9,54					3,96				23,52	13,35			
61	4173000	11,34					13,80					23,83				
62	4173083															
63	4173100	11,34	10,06	11,76	14,86			19,62	8,66	11,96		19,09	20,16	14,33	15,64	
64	4173705															
65	4173710															
66	4173720															
67	4173737	7,75										16,38				
68	4173740															
69	4174000															
70	4174130															
71	4174250	9,14	8,66	10,37	12,68			2,00	2,00	2,00		2,00	7,01	10,28	2,00	
72	4174365															
73	4174480															
74	4174520	7,10										36,02				
75	4174540		8,45	9,29	10,49			14,33	16,39	3,98			21,31	19,64	11,84	
76	4174550															
77	4174660															
78	4174670															
79	4174940															
80	4175100	8,08	7,81	8,64				3,71	9,68			19,32	6,67	11,82		
81	4175120															
82	4175180															
83	4175450	8,47										24,54				
84	4175500															
85	4176000	8,47					2,00					10,05				
86	4176480	8,47					14,63					24,52				
87	4177050	8,62					4,23					9,78				
88	4177900															
89	4178000	11,25	10,15	10,60	13,41	13,65		24,10	12,78	11,71	5,65	21,52	11,97	17,93	10,30	
90	4178103															
91	4178127	14,21					2,00					11,69				
92	4178330															
93	4178455															
94	4178486															
95	4178490															
96	4178650			13,18										12,79		
97	4178950															

A. 4

N°	Code Station P	W2%					M2% Pdisous					M2% Ptot				
		2007-2011	2002-2006	1997-2001	1992-1996	1987-1991	2007-2011	2002-2006	1997-2001	1992-1996	1987-1991	2007-2011	2002-2006	1997-2001	1992-1996	1987-1991
98	4179000	13,40	11,78	11,94			10,97	4,83			14,26		11,78			
99	4179270															
100	4179300															
101	4179500	12,22	10,89	11,89	15,81	17,21	13,68	16,48	15,97	19,62	17,85	19,61	17,25	21,10	24,73	
102	4179530															
103	4180100	9,70									20,58					
104	4180900	7,86									21,17					
105	4181960															
106	4182000	12,17		12,44							24,75		17,00			
107	4182500															
108	4182990															
109	4183000															
110	4184195	8,55									22,80					
111	4184700															
112	4184830	9,39									28,10					
113	4184950	8,63									23,51					
114	4185000															
115	4185500			10,42				5,33					13,70			
116	4186700															
117	4187010															
118	4187525	14,22									28,66					
119	4188000	11,10		13,01				16,63			27,81		18,93			
120	4188500															
121	4189000															
122	4189200	11,10		13,01	14,34			2,62	7,20		23,40		6,46	8,54		
123	4190000	11,47	11,32	13,74			12,90	8,61			23,92		21,13			
124	4190550	11,47	11,32	13,74			11,83	9,15	9,30		15,57		17,56			
125	4190660	9,19	7,79	10,22			15,38	10,73	9,46		14,92	13,23	7,72			
126	4190670	9,19	7,79	10,22							10,03	14,32	12,57			
127	4190690	9,91	9,07								14,94	21,10				
128	4190700	11,46	9,57	11,35							14,25	11,49	20,53			
129	4190720	11,46	9,57								15,02	12,39				
130	4190750	11,46	9,57	11,35			13,29	13,46			15,03	13,71	16,50			
131	4190770		9,57	11,35									18,25	14,64		
132	4190780															
133	4190850		9,67	10,92	12,64	15,90	9,59	7,86	21,57	7,30			14,99	8,26	7,07	
134	4191410	11,47									22,27					
135	4191900															
136	4192100	11,47	10,39	13,26	13,27		13,12	12,97	17,58	16,70	8,00		17,37	26,07		
137	4192800	15,28	12,99				13,30				17,76	15,25				
138	4192830	15,28									28,72					
139	4193000			16,74				18,43					20,28			
140	4193800	10,19									4,13					
141	4194000		10,87	14,81	16,22	18,18	16,69	17,18	17,74	20,16			23,47	19,35	25,05	
142	4195000	12,18		13,55				15,07			15,22		10,92			
143	4195400															
144	4195700		11,98	15,11			10,40						16,88	29,43		
145	4196008	13,70									33,45					
146	4196449	14,20									25,45					
147	4197700	14,20	11,28				18,84				24,25	26,41				
148	4199200	14,20	11,28	14,12	15,90	19,85		13,07	12,12	17,56	26,67	21,04	19,37	16,04	14,93	
149	4199401															
150	4199490	18,41									17,78					
151	4199630		17,50									22,96				
152	4199865	13,72									15,49					
153	4201000	14,06	12,89	11,53	14,81		12,55	3,52	9,92	12,21	11,96	12,19	13,57	18,00		
154	4201051	14,22					31,14				30,37					
155	4201170	23,66	25,19				22,60	26,82			25,72	26,60				
156	4201990	16,85	15,46				17,90				21,33	22,53				
157	4204000	24,05	20,51				29,77				30,97	24,72				
158	4204300	16,77	15,17	13,22			20,89	13,31			22,01	22,18	16,69			
159	4205500	16,43	13,02					5,58			14,33	14,33				
160	4205620	22,90	17,05				24,71	17,46			27,12	21,59				
161	4207000															
162	4208350	21,66	16,16				23,22	20,93			23,79	27,56				
163	4209000	21,66	16,16	21,78				15,33	18,94		23,16	20,57	28,22			
164	4209100	21,66	16,16				19,38	15,11			22,02	21,55				
165	4209990	16,29	15,50					16,66			18,87	19,60				
166	4211000	18,06	18,42	16,56	21,28		15,54	21,52	13,34	12,25	16,40	20,29	17,90	13,87		
167	4211550		27,35								37,84					
168	4212700	26,03	25,08	20,28				35,97	32,22		27,86	34,15	32,04			
169	4212800	16,29	15,50				21,89	18,19			18,47	19,72				
170	4213000				19,92					9,99				14,65		
171	4214295	24,54									29,70					
172	4214500															
173	4215195															
174	4215520															
175	4215750															
176	4216000				19,36	23,65			24,05	17,85			20,80	20,89		
177	4310002															
178	22000050	8,90	8,24								14,98	20,25				
179	22000067	13,70	11,14								29,21	24,60				
180	22000109	11,63	9,72								25,14	17,03				
181	22000152	11,50	11,59								21,48	24,75				
182	22000152	11,50	11,59								21,48	24,75				
183	22000183	11,20	8,25								25,98	24,92				
184	22000411	14,20	11,87								20,27	25,38				
185	22000694	12,18	11,03								14,33	22,24				
186	22000705		9,35									18,50				
187	22000729	11,01	9,54								22,20	22,72				
188	22000762	11,34	10,06								29,21	17,89				
189	29000079															
190	29000614		10,15	10,60								24,20	20,30			
191	56000169		10,39									7,24				
192	56000182		12,43									14,62				
193	56000239															
194	56000260															
195	56000276															

A. 7

N°	Code Station P	Flux Ptot d'étiage														Flux Pd d'étiage															
		2007-2011			2002-2006			1997-2001		1992-1996			1987-1991			2007-2011		2002-2006		1997-2001		1992-1996		1987-1991							
		Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur	Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur	Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur	Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur	Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Haute						
1	11																														
2	12																														
3	13																														
4	14																														
5	17																														
6	18																														
7	19																														
8	23																														
9	4161600																														
10	4162000	5,91	6,67	7,42	7,01	7,66	8,32	11,54	13,29	15,03	9,82	15,71	21,61			2,74	3,11	3,47	3,20	3,52	3,83	5,99	7,19	8,39	7,45	13,72	19,99				
11	4162160																														
12	4162200	10,73	11,53	12,33	13,50	14,44	15,38	18,16	18,16	18,16						6,49	7,03	7,56	7,38	7,86	8,33	9,06	9,06	9,06							
13	4162300																														
14	4162900																														
15	4162930																														
16	4162958																														
17	4163000	4,35	4,71	5,07	8,79	9,40	10,00	12,28	13,52	14,77	10,28	11,66	13,04	23,32	25,51	27,70	2,09	2,32	2,55	3,74	4,21	4,67	6,13	6,96	7,80	5,92	7,42	8,93	14,93	16,43	17,94
18	4163500	0,41	0,56	0,70	0,39	0,56	0,73	1,85	2,11	2,36							0,22	0,34	0,46	0,16	0,24	0,32	0,63	0,79	0,95						
19	4163550	7,00	8,59	10,19	4,23	5,54	6,86	11,95	13,43	14,90							4,97	6,19	7,41	2,20	3,07	3,93	4,26	5,12	5,99						
20	4164800	2,16	2,34	2,51	3,11	3,57	4,03	5,86	7,18	8,50	2,93	3,32	3,70				0,78	0,87	0,96	1,31	1,50	1,69	3,55	4,29	5,03	1,99	2,37	2,76			
21	4164850	3,19	3,68	4,16	4,19	4,51	4,84	7,47	8,72	9,98	8,91	12,32	15,73	13,01	19,35	25,68	1,05	1,26	1,48	2,40	2,58	2,76	3,38	3,79	4,21	5,76	8,61	11,47	9,15	10,46	11,77
22	4164870																														
23	4164950	0,66	0,94	1,22	0,45	0,59	0,73	1,78	2,18	2,58							0,39	0,59	0,79	0,23	0,30	0,38	0,83	0,97	1,10						
24	4165050																														
25	4165200																														
26	4165700	1,14	1,43	1,73	0,68	0,98	1,29	3,29	3,62	3,96							0,66	0,86	1,06	0,15	0,20	0,25	1,19	1,40	1,61						
27	4166050																														
28	4166100																														
29	4166300	1,29	1,71	2,13	1,74	2,14	2,53	4,25	4,54	4,82																					
30	4166800	1,08	1,39	1,70	2,21	2,92	3,63	2,70	3,11	3,51	2,05	2,55	3,05				0,54	0,66	0,78	1,41	1,92	2,42	1,51	1,89	2,28	1,70	2,13	2,55			
31	4166900	1,06	1,21	1,36	3,23	3,72	4,22	3,63	4,13	4,62	1,54	1,70	1,86				0,24	0,30	0,35	2,17	2,57	2,97	1,61	2,33	3,05	0,94	1,10	1,26			
32	4166950	0,46	0,58	0,70	0,83	1,10	1,37	0,79	1,18	1,57							0,24	0,32	0,39	0,42	0,57	0,71	0,43	0,71	0,99						
33	4167000	1,19	1,45	1,70	1,39	1,75	2,12	1,69	2,02	2,36	1,64	2,31	2,97	1,10	1,56	2,01	0,65	0,77	0,90	0,63	0,74	0,86	0,90	1,18	1,47	0,70	0,89	1,07	0,62	0,84	1,06
34	4167010	1,29	1,46	1,63	2,09	2,38	2,67	2,97	3,37	3,77	1,57	1,88	2,18				0,54	0,62	0,69	1,10	1,35	1,60	0,96	1,36	1,76	0,95	1,10	1,25			
35	4167050	1,02	1,22	1,41	1,15	1,47	1,78	0,82	1,25	1,68							0,66	0,78	0,91	0,70	0,88	1,07	0,56	0,77	0,99						
36	4167100	0,88	1,02	1,16	0,84	0,96	1,07	1,01	1,29	1,57	0,50	0,63	0,77				0,30	0,37	0,44	0,23	0,33	0,42	0,52	0,59	0,65	0,22	0,28	0,34			
37	4167600	3,62	4,05	4,48	3,66	4,85	6,05	4,50	5,12	5,74	8,57	8,57	8,57				2,50	2,86	3,21	2,42	3,37	4,32	3,26	3,71	4,15	8,47	8,47	8,47			
38	4168140	5,51	6,54	7,57	6,29	7,21	8,14	7,43	8,88	10,34	5,87	6,45	7,03	5,12	5,89	6,66	3,51	4,07	4,62	3,74	4,15	4,56	5,47	6,48	7,50	4,19	4,70	5,21	3,47	4,05	4,63
39	4168210	2,20	2,71	3,21	1,81	2,67	3,52	2,39	2,73	3,08	2,52	3,22	3,93				1,50	1,86	2,22	1,26	1,83	2,41	1,60	1,90	2,19	2,00	2,67	3,33			
40	4168250	5,07	5,52	5,97	6,10	7,23	8,36	11,27	13,64	16,02	14,02	15,93	17,85				3,74	4,09	4,45	4,85	5,59	6,32	8,81	9,74	10,67	10,99	13,31	15,63			
41	4170000	6,86	7,84	8,83	8,72	9,98	11,24	13,41	14,56	15,70	26,01	26,99	27,97				3,99	4,44	4,90	4,95	5,64	6,32	7,91	8,78	9,64	25,92	26,64	27,36			
42	4170500	6,15	7,01	7,87	9,15	10,08	11,02	13,91	15,59	17,26	11,84	13,11	14,39	12,55	14,05	15,56	3,91	4,39	4,88	4,64	5,15	5,67	7,69	9,05	10,42	7,22	8,31	9,41	8,21	9,16	10,12
43	4170700	3,98	4,33	4,67	4,49	5,10	5,71	5,26	5,81	6,37	4,22	4,73	5,23				2,86	3,11	3,36	2,98	3,42	3,87	3,77	4,05	4,33	3,37	3,89	4,40			
44	4171000																														
45	4171010	2,48	2,93	3,37	4,12	4,36	4,61	4,36	4,88	5,40	3,05	4,36	5,68				1,12	1,26	1,39	1,77	1,93	2,09	1,73	1,99	2,24	1,46	2,43	3,40			
46	4171050	7,13	7,91	8,69	6,50	7,31	8,11	8,94	9,83	10,73	4,28	5,98	7,69				5,25	5,82	6,39	4,59	5,16	5,74	6,31	6,88	7,45	4,08	5,78	7,47			
47	4171300	6,08	7,15	8,21	3,88	4,38	4,89	3,93	4,26	4,59	7,17	8,58	9,99				3,81	4,24	4,68	2,42	2,82	3,22	2,17	2,38	2,58	6,25	7,60	8,95			
48	4171400	4,68	5,07	5,47	4,37	4,68	4,98	4,33	4,97	5,61	5,54	5,54	5,54				3,57	3,88	4,18	3,31	3,55	3,79	3,18	3,71	4,24	5,50	5,50	5,50			
49	4171450	3,61	4,16	4,70	4,35	4,63	4,91	6,77	8,02	9,27	5,53	6,43	7,34	5,10	6,00	6,90	2,34	2,60	2,87	2,85	3,05	3,25	3,99	4,55	5,12	4,23	4,99	5,75	3,94	4,58	5,23
50	4171750	7,72	8,47	9,23	7,35	8,46	9,58	11,16	12,48	13,80	11,66	11,70	11,73				4,19	4,56	4,93	4,61	5,23	5,84	6,63	7,18	7,74	7,31	9,39	11,47			
51	4171860																														
52	4171870	9,25	9,95	10,65	14,29	15,73	17,17	18,23	19,67	21,10	23,46	23,46	23,46				5,11	5,52	5,94	10,46	11,46	12,45	13,81	14,95	16,08	22,95	22,95	22,95			
53	4172030	9,02	10,37	11,71	12,97	14,05	15,12	16,86	18,13	19,41	20,17	23,78	27,40	18,42	21,52	24,62	5,48	6,28	7,08	8,71	9,48	10,24	12,46	13,30	14,15	16,15	18,78	21,40	15,72	18,06	20,40
54	4172060	8,38	9,51	10,63													5,41	6,16	6,91												
55	4172070																														
56	4172370	4,91	5,38	5,86	7,71	8,84	9,98	9,80	10,70	11,61	10,25	12,10	13,94	8,42	10,51	12,60	3,38	3,69	4,00	5,20	5,71	6,22	6,36	6,77	7,18	6,87	7,63	8,40	6,32	8,11	9,89
57	4172570	8,63	9,39	10,14	10,26	11,44	12,63	13,20	14,45	15,69	9,82	12,82	15,82	5,45	6,99	8,53	6,29	6,89	7,49	6,74	7,25										

A. 8

N°	Code Station P	Flux Plot d'étiage															Flux Pd d'étiage																	
		2007-2011			2002-2006			1997-2001			1992-1996			1987-1991			2007-2011			2002-2006			1997-2001			1992-1996			1987-1991					
		Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute	Valeur Basse	Valeur Valeur	Valeur Haute			
98	4179000	6,72	7,66	8,60	8,77	10,02	11,27	14,74	16,85	18,97	29,81	34,49	39,18	19,54	26,45	33,37	4,58	5,33	6,07	5,22	6,19	7,15	11,10	12,58	14,06	17,58	20,18	22,77	15,08	17,41	19,74			
99	4179270																																	
100	4179300																																	
101	4179500	2,89	3,67	4,46	5,20	6,18	7,16	5,14	6,11	7,08	7,24	8,77	10,31	6,37	7,70	9,03																		
102	4179530																																	
103	4180100	2,79	3,24	3,69	2,62	3,20	3,79																											
104	4180900	2,67	3,26	3,84	5,37	5,90	6,44																											
105	4181960	15,95	17,85	19,75	16,65	19,54	22,43																											
106	4182000	3,43	3,69	3,95	5,05	5,95	6,86	17,03	22,29	27,55	20,48	31,14	41,80																					
107	4182500																																	
108	4182990	5,58	15,40	25,22	5,44	6,27	7,10										3,20	10,66	18,12	2,96	3,51	4,06												
109	4183000																																	
110	4184195	7,09	7,56	8,03	7,21	8,07	8,93										4,30	4,65	5,00	3,58	4,28	4,98												
111	4184700																																	
112	4184830	9,13	10,40	11,67	16,19	18,22	20,24										6,38	7,13	7,87	10,49	12,04	13,58												
113	4184950	8,48	9,35	10,22	10,42	10,42	10,42										5,23	5,77	6,31	5,95	5,95	5,95												
114	4185000																																	
115	4185500																																	
116	4186700	5,22	5,22	5,22	5,11	6,37	7,63	7,56	9,08	10,60	6,95	8,76	10,57	11,49	14,12	16,75																		
117	4187010																																	
118	4187525	4,05	4,63	5,20	4,81	5,48	6,16										2,35	2,88	3,40	2,40	3,04	3,67												
119	4188000	3,18	3,78	4,37	4,47	5,31	6,16	6,22	7,94	9,66	8,56	11,24	13,92	7,65	8,10	8,55																		
120	4188500																																	
121	4189000																																	
122	4189200	9,44	10,39	11,34	10,26	11,20	12,15	20,01	24,73	29,45	36,93	41,36	45,80	36,30	40,83	45,35	4,37	4,88	5,39	5,84	6,57	7,31	12,87	16,88	20,88	19,76	22,19	24,62	22,31	24,78	27,25			
123	4190000	6,04	6,81	7,59	10,58	11,81	13,03	15,94	17,85	19,75	19,82	22,85	25,88	19,01	24,58	30,15	3,47	4,08	4,69	5,63	6,17	6,71	9,13	10,33	11,53	9,20	10,33	11,45	11,31	13,31	15,31			
124	4190550	9,37	10,38	11,40	12,91	14,09	15,28	17,47	19,55	21,62	27,96	33,88	39,81	30,05	35,87	41,69	4,49	4,89	5,28	6,90	7,56	8,21	9,80	11,04	12,29	15,92	17,21	18,50	16,88	19,92	22,96			
125	4190660	5,63	6,19	6,74	3,68	4,43	5,17	7,23	8,62	10,02							2,61	2,89	3,17	1,90	2,30	2,70	3,06	3,69	4,33									
126	4190670	4,24	4,61	4,99	2,99	3,63	4,28	4,94	5,63	6,32	8,25	8,25	8,25				2,10	2,30	2,51	1,58	1,90	2,22	2,32	2,66	2,99	8,07	8,07	8,07						
127	4190690	5,97	6,51	7,05	7,17	7,98	8,79	8,26	8,94	9,63							2,46	2,62	2,77	2,79	3,27	3,76	2,60	2,94	3,27									
128	4190700	2,87	3,19	3,50	3,77	5,96	8,15	3,37	3,96	4,56																								
129	4190720	2,08	2,31	2,55	2,93	6,85	10,77	2,63	3,23	3,83																								
130	4190750	3,58	3,96	4,34	4,88	7,05	9,21	6,23	7,25	8,27							1,76	1,97	2,19	2,25	2,86	3,46	3,73	4,24	4,76									
131	4190770	4,94	7,93	10,92	5,42	7,55	9,68	6,68	8,19	9,70							2,25	4,96	7,68	1,93	2,07	2,21	2,06	2,69	3,32									
132	4190780																																	
133	4190850	6,67	7,76	8,85	7,60	8,56	9,52	8,92	12,11	15,30	14,41	16,52	18,64	15,04	17,39	19,75	2,42	2,73	3,05	2,59	3,03	3,48	4,59	5,85	7,12	5,18	6,08	6,98	6,66	7,44	8,21			
134	4191410																																	
135	4191900																																	
136	4192100	7,54	8,32	9,10	9,93	10,82	11,71	12,00	16,03	20,07	15,50	17,95	20,40	23,75	25,34	26,94	3,20	3,81	4,41	4,26	4,87	5,47	5,11	5,72	6,32	6,64	8,50	10,37	13,20	15,23	17,26			
137	4192800	2,14	2,67	3,20	4,68	6,36	8,04										0,99	1,36	1,74	2,68	3,75	4,82												
138	4192830	1,47	1,80	2,14	0,50	0,56	0,62										0,78	0,93	1,08	0,19	0,22	0,26												
139	4193000																																	
140	4193800	8,26	12,25	16,24	3,98	5,72	7,46										4,13	8,42	12,70	1,81	2,06	2,31												
141	4194000	3,54	4,04	4,54	8,24	8,95	9,65	8,31	9,67	11,04	7,84	8,73	9,61	14,89	17,15	19,41	2,42	3,49	4,57	2,82	3,66	4,50	1,91	2,36	2,81	2,54	2,99	3,43	4,64	5,11	5,58			
142	4195000	2,97	3,58	4,20	4,81	5,71	6,60	5,51	6,51	7,50	8,91	11,25	13,59	6,81	9,78	12,76	1,54	1,58	1,62	1,78	2,15	2,51	2,25	3,26	4,28	3,01	3,43	3,85	1,93	3,49	5,06			
143	4195400	0,98	1,13	1,28	1,82	2,42	3,02	2,24	2,73	3,23	1,32	3,96	6,60																					
144	4195700																																	
145	4196008																																	
146	4196449	2,96	3,64	4,32	2,45	3,23	4,01										1,71	2,51	3,30	0,77	1,10	1,44												
147	4197700	3,91	4,32	4,73	2,77	3,35	3,93										1,55	1,79	2,03	0,46	0,65	0,83												
148	4199200	2,89	3,43	3,96	4,41	5,98	7,56	9,22	10,60	11,99	8,65	10,34	12,03	5,26	6,34	7,43	1,64	2,02	2,41	1,72	2,79	3,86	4,60	6,16	7,72	4,03	5,48	6,92	1,56	2,25	2,94			
149	4199401																																	
150	4199490	0,58	0,89	1,20	0,27	0,41	0,56																											
151	4199630																																	
152	4199865	1,69	2,06	2,43	1,41	2,01	2,62																											
153	4201000	9,25	10,35	11,46	13,00	14,70	16,41	14,66	16,88	19,10	14,70	16,73	18,76	16,54	19,45	22,37	4,45	5,18	5,91	5,46	6,52	7,59	5,45	7,52	9,58	8,62	9,87	11,13	6,66	8,44	10,22			
154	4201051	3,46	4,22	4,99	15,25	20,84	26,44										1,85</																	

A. 9 : Abaque de calcul des incertitudes (Table II) reproduit d'après Moatar et al. (2012) et abaque d'aide au choix des méthodes de calcul de flux (Table 3) en fonction des indicateurs b_{50sup} et $W_{2\%}$ reproduit d'après Raymond et al. (2013).

Table II. Error nomograph parameters for different sampling intervals and reporting periods (1, 3 and 5 years): $y = \alpha x^2 + \beta x$, where $x = M_{25}$ and $y = \epsilon_{50}$ (bias), ϵ_{10} (10th imprecision percentile), ϵ_{90} (90th imprecision percentile)

d	Bias for $b_{50sup} < 0$																	
	1 year				3 years				5 years									
	u	v	R ²	R ²	u	v	R ²	R ²	u	v	R ²	R ²						
3	0	-0.0002	0.01	0.0003	0	-0.0003	0.00	0.0007	0.04	-0.0008	0.0080	0.52	-0.0001	-0.0005	0.08	0.0000	-0.0087	0.07
5	0	0.028	0.18	0	0.019	0.11	0	0.010	0.13	-0.002	0.018	0.77	-0.001	0.011	0.55	-0.0007	0.0003	0.41
7	0	0.056	0.27	0	0.034	0.26	0	0.018	0.22	-0.003	0.019	0.85	-0.002	0.009	0.64	-0.001	-0.003	0.53
10	0	0.083	0.28	0	0.046	0.24	0	0.032	0.12	-0.005	0.030	0.83	-0.003	0.035	0.74	-0.002	0.017	0.65
15	0	0.121	0.37	0	0.079	0.35	0	0.057	0.36	-0.006	0.005	0.89	-0.003	0.021	0.80	-0.002	-0.002	0.68
20	0	0.166	0.33	0	0.102	0.29	0	0.085	0.33	-0.008	-0.031	0.91	-0.004	0.011	0.83	-0.003	0.000	0.74
25	0	0.217	0.34	0	0.138	0.30	0	0.107	0.31	-0.008	-0.093	0.92	-0.005	0.011	0.83	-0.004	-0.010	0.73
30	0	0.255	0.34	0	0.165	0.29	0	0.130	0.25	-0.009	-0.140	0.91	-0.007	0.039	0.91	-0.005	-0.003	0.81
60	0	0.419	0.36	0	0.230	0.34	0	0.167	0.21	-0.007	-0.524	0.90	-0.008	-0.127	0.93	-0.007	-0.049	0.91

d	10th imprecision percentile - ϵ_{10}												90th imprecision percentile - ϵ_{90}											
	1 year				3 years				5 years				1 year				3 years				5 years			
	u	v	R ²	R ²	u	v	R ²	R ²	u	v	R ²	R ²	u	v	R ²	R ²	u	v	R ²	R ²	u	v	R ²	R ²
3	-0.005	-0.289	0.91	-0.003	-0.183	0.88	-0.002	-0.152	0.88	0.002	0.350	0.85	0.002	0.201	0.88	0.002	0.163	0.87						
5	-0.005	-0.445	0.93	-0.004	-0.242	0.92	-0.003	-0.198	0.91	0.003	0.513	0.82	0.003	0.285	0.86	0.003	0.245	0.84						
7	-0.004	-0.584	0.94	-0.004	-0.331	0.93	-0.003	-0.275	0.93	0.003	0.639	0.81	0.004	0.355	0.84	0.003	0.311	0.81						
10	-0.004	-0.689	0.94	-0.005	-0.365	0.93	-0.004	-0.302	0.93	0.003	0.784	0.83	0.004	0.463	0.81	0.003	0.382	0.82						
15	-0.003	-0.894	0.94	-0.005	-0.496	0.94	-0.004	-0.395	0.94	0.0005	1.019	0.82	0.003	0.620	0.80	0.003	0.517	0.77						
20	0	-1.162	0.95	-0.004	-0.619	0.95	-0.004	-0.505	0.95	0	1.100	0.77	0.003	0.735	0.85	0.003	0.601	0.83						
25	0	-1.234	0.94	-0.004	-0.721	0.95	-0.004	-0.574	0.96	0	1.150	0.74	0.002	0.879	0.81	0.003	0.701	0.74						
30	0	-1.290	0.92	-0.003	-0.821	0.95	-0.004	-0.645	0.96	0	1.200	0.69	0	1.100	0.83	0	1.010	0.83						
60	0	-1.509	0.86	0	-1.224	0.94	0	-1.079	0.96	0	1.250	0.38	0	1.200	0.70	0	1.095	0.76						

Table 3. Recommended flux calculation methods for monthly frequency, presented through the flux variability matrix ($W_{2\%}$, b_{50sup}). DWC: discharge-weighted concentration methods; IRC: integral rating curve method (with Ferguson correction); SRC50*: segmented rating curve method (with Ferguson correction); HSM: modified hydrograph separation method (10th and 90th percentiles of inter-station inter-annual flux errors).

	$b_{50sup} < -0.2$	$-0.2 < b_{50sup} < 0.2$	$0.2 < b_{50sup} < 0.8$	$0.8 < b_{50sup} < 1.4$	$b_{50sup} > 1.4$
$W_{2\%} > 25$	DWC	Not documented	Not documented	HSM	HSM
$15 < W_{2\%} < 25$	IRC*	Not documented	HSM, SRC50* ^(b)		
$10 < W_{2\%} < 15$	DWC	IRC*, SRC50* ^(b)	Not documented	IRC*, SRC50* ^(c)	HSM
$W_{2\%} < 10$	IRC*	DWC	DWC	IRC*, SRC50* ^(c)	

Notes: ^(a) For e-D and s-D types; ^(b) For d-S and e-S types; ^(c) For d-C and s-C types.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'Eau Loire Bretagne. (2006). Fiches d'évaluation de l'efficacité écologique des actions financées par l'agence – La Laïta à Quimperlé.
- Agence de l'Eau Loire Bretagne. (2009). Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Loire-Bretagne 2010-2015.
- Aurousseau, P. (2001). Les flux d'azote et de phosphore provenant des bassins versants de la rade de Brest. Comparaison avec la Bretagne. *Océanis*, 27(2), 137-162.
- Birgand, F., Bordenave, P., Saint-Cast, P., Le Saos, E., & Serrand, P. (2005, September). Evaluation of sampling strategies for estimating nutrient fluxes at the outlets of agricultural watersheds. In *6th international conference, European Water Resources Association* (pp. 7-10).
- Birgand, F., Fauchoux, C., Gruau, G., Moatar, F., & Meybeck, M. (2011). Uncertainties in assessing annual nitrate loads and concentration indicators: Part 2. Deriving sampling frequency charts in Brittany, France. *Trans. ASABE*, 54(1), 93-104.
- Burt, T. P., Howden, N. J. K., Worrall, F., & McDonnell, J. J. (2011). On the value of long-term, low-frequency water quality sampling: avoiding throwing the baby out with the bathwater. *Hydrological Processes*, 25(5), 828-830.
- Cassidy, R., & Jordan, P. (2011). Limitations of instantaneous water quality sampling in surface-water catchments: comparison with near-continuous phosphorus time-series data. *Journal of Hydrology*, 405(1), 182-193.
- Conseil Scientifique de l'Environnement de Bretagne (CSEB) (2013) Gestion des sols et apports de déchets organiques en Bretagne. *Rapport d'Etude*, 52p.
- CORPEN, (1998). Programme d'action pour la maîtrise des rejets de phosphore provenant des activités agricoles. Paris : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. 85 p.
- Correll, D. L. (1998). The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, 27(2), 261-266.
- Crouzet, P., Le Gall, G., & Meybeck, M. (2002). Flux à la mer: trop d'azote, mais moins de phosphore. *IFEN, Les Données de l'environnement*.
- Czamanski, M., Ragueneau, O., Pondaven, P., (2012). Le réseau ECOFLUX, qualité de l'eau et eutrophisation en Finistère - Rapport 2012, *IUEM, UBO, Conseil Général du Finistère*.
- Dahlke H.E., Easton Z.M., Lyon S.W., ., Walter M.T., Destouni G., Steenhuis T.S. (2012) Dissecting the variable source area concept – Subsurface flow pathways and water mixing processes in a hillslope. *Journal of Hydrology* 420–421: 125–141.
- Dorioz J.M., Trévisan D., Vansteelant J.Y., (1997). Transferts diffus de phosphore des bassins versants agricoles vers les lacs : impacts, ordre de grandeur, mécanismes. *L'eau dans l'espace rural. Productions végétales et qualités de l'eau. INRA Ed.*, 249-264.

-
- Dupas R., Gascuel-Oudou C, Gillet N., Grimaldi C., Gruau G. . (2015) Distinct export dynamics for dissolved and particulate phosphorus reveal independent transport mechanisms in a lowland agricultural catchment. *Hydrological Processes*, soumis.
- Ferguson, R. I. (1986). River loads underestimated by rating curves. *Water Resources Research*, 22(1), 74-76.
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (1992). *Statistical methods in water resources* (Vol. 49). Elsevier.
- Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20(6), 727-732.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water resources research*, 18(1), 107-121.
- Johnes, P. J. (2007). Uncertainties in annual riverine phosphorus load estimation: impact of load estimation methodology, sampling frequency, baseflow index and catchment population density. *Journal of Hydrology*, 332(1), 241-258.
- Jordan-Meille L., Dorioz J.M. (2004) Soluble phosphorus dynamics in an agricultural watershed. *Agronomie* 24: 237–248.
- Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., & Daroussin, J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. *Rapport INRA, IFEN*.
- Lemercier, B. (2003). La pollution par les matières phosphorées en Bretagne: sources, transfert et moyens de lutte. *Rapport d'Etude, Direction Régionale de l'Environnement Bretagne.*, 85p.
- Lopez, B., & Leynet, A. (2011). Evaluation des tendances d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines. *Revue des méthodes statistiques existantes et recommandations pour la mise en œuvre de la DCE. Rapport BRGM/RP-59515-FR*.
- Meybeck, M., & Moatar, F. (2012). Daily variability of river concentrations and fluxes: indicators based on the segmentation of the rating curve. *Hydrological Processes*, 26(8), 1188-1207.
- Moatar, F., Meybeck, M., Raymond, S., Birgand, F., & Curie, F. (2013). River flux uncertainties predicted by hydrological variability and riverine material behaviour. *Hydrological Processes*, 27(25), 3535-3546.
- Pella, H., Snelder, T., Lamouroux, N., Vanderbecq, A., Shankar, U., & Rogers, C. (2008). Réseau hydrographique naturel étendu (RHE) construit à partir de la BD Carthage. *Ingénieries-EAT*, (55-56).
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied statistics*, 126-135.
- Quemeneur, G. (1987). Dynamique du phosphore sur un bassin versant expérimental en région d'élevage intensif, *Mémoire ENGEES, Cemagref Rennes*, 100 p.
- Raymond, S., Moatar, F., Meybeck, M., & Bustillo, V. (2013). Choosing methods for estimating dissolved and particulate riverine fluxes from monthly sampling. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1326-1339.

-
- Schindler, D. W., Hecky, R. E., Findlay, D. L., Stainton, M. P., Parker, B. R., Paterson, M. J., ... & Kasian, S. E. M. (2008). Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(32), 11254-11258.
- Walling DE, Webb BW. (1981). The reliability of suspended sediment load data. *International Association of Hydrological Sciences Publication (133)*: 177–194.
- Yue, S., & Wang, C. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*, *18*(3), 201-218.