

LES FLUX DE NUTRIMENTS ET LEUR VARIABILITÉ : SUIVI À HAUTE FRÉQUENCE DES PARAMÈTRES BIOGÉOCHIMIQUES DANS LE WIMEREUX

Novembre 2012



www.eau-artois-picardie.fr

Les Flux de nutriments et leur variabilité : suivi à haute fréquence des paramètres biogéochimiques dans le Wimereux

François G Schmitt, Sylvie Zongo

*Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR LOG 8187, Station marine, 28
av Foch, 62930 Wimereux*

Juillet 2011 – novembre 2012

Table des matières

Résumé opérationnel	2
I. Introduction.....	6
II. Matériels et Méthode	8
A. Site d'étude : paramètres physico-chimiques mesurés.....	10
B. Méthodologie : calcul du flux de nutriments.....	14
III. Résultats	16
A. Flux de nitrate (NO ₃) en rivière	16
B. Flux d'ammonium (NH ₄) en rivière.....	20
C. Flux de phosphate (PO ₄) en rivière	23
D. Flux de carbone organique total (COT) en rivière	27
E. Intervalle de confiance autour de la valeur des flux mensuels	30
IV. Discussion & conclusion.....	32
Références	37
Annexes	38

Résumé opérationnel

Cadre général.

Cette étude effectuée dans le cadre d'une convention entre l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et le LOG, porte sur l'estimation de flux de nutriments au cours de deux campagnes (du 15 septembre au 11 octobre 2010 (automne) et du 18 janvier au 14 février 2011 (hiver)) réalisées par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie à haute fréquence sur la rivière Wimereux à la station de mesure de Wimille. Le Wimereux est l'une des rivières du Nord/Pas-de-Calais qui contribue aux apports des nutriments en Manche orientale ; il est pris ici comme exemple pour cette étude méthodologique. Cette étude vise à déterminer tout d'abord la quantité de matière azotée et non azotée émise par le Wimereux à haute fréquence : il s'agit des flux de NO₃ (nitrate), NH₄ (ammonium), PO₄ (phosphate) et COT (Carbone Organique Total), estimés à partir de données haute fréquence. Les apports sont fonction du régime hydrologique du Wimereux à Wimille et changent au cours de chaque saison et même au cours de chaque mois ; nous présentons donc les résultats dans des tableaux pour 4 mois (septembre 2010, octobre 2010, janvier 2011, février 2011).

Ensuite, en comparant ces valeurs moyennes données par de la haute fréquence à celles estimées par des mesures à basse fréquence (1 donnée mensuelle), on note qu'elles sont **généralement différentes** quelle que soit la saison ou le paramètre. Ceci provient du fait que les mesures « exactes » sont les mesures à haute fréquence, tandis que **les estimations à basse fréquence sont des approximations, provenant du fait que les flux sont très variables et qu'une mesure ponctuelle peut accidentellement tomber sur une forte ou une faible valeur, non représentative de la moyenne**. Notre étude permet de quantifier l'erreur faite lorsqu'on utilise ces approximations instantanées faites mensuellement dans le cadre d'un réseau de surveillance.

Résultats.

Dans ce qui suit, nous prenons comme valeur exacte, le flux moyen F_m estimé à partir des données haute fréquence : c'est la colonne en gras dans les tableaux. Ensuite, on considère qu'une mesure ponctuelle peut tomber dans une période forte ou faible du flux, selon les cas ; cette mesure ponctuelle peut donc prendre une certaine gamme de valeurs. Nous estimons un intervalle où se trouvent 95% des valeurs possibles de ces mesures ponctuelles, intervalle estimé à partir des valeurs instantanées à haute fréquence. En un mot, cet intervalle indique les valeurs possibles (95% d'entre elles) des mesures ponctuelles mensuelles.

La colonne « Flux basse fréquence » donne la valeur estimée à partir des données mensuelles dans le cadre du réseau de surveillance de l'Agence de l'Eau. La dernière colonne, donnant le « facteur correctif », indique par combien il faut multiplier le flux estimé ponctuellement pour obtenir la valeur exacte.

Flux NO3 en kg/jour	Haute fréquence			Basse fréquence : à partir des mesures mensuelles	Facteur correctif
	Flux moyen F_m	Intervalle contenant 95% des valeurs		Flux basse fréquence F_{BF}	F_m / F_{BF}
		Borne mini.	Borne maxi.		
Septembre 2010	171	80	766	172	1.0
Octobre 2010	948	190	2749	175	5.4
Janvier 2011	1655	811	2730	1865	0.9
Février 2011	940	545	1927	540	1.7

Tableau synthétique des résultats pour les nitrates.

On note :

- La mesure ponctuelle basse fréquence mensuelle ne tombe pas dans l'intervalle contenant 95% des valeurs en octobre 2010 et février 2011.
- Le facteur correctif varie de 0.9 à 5.4 ; on peut dire que les mesures ponctuelles mensuelles étaient correctes à un facteur 5.4 près.
- En général, étant données les valeurs des bornes en relation avec le flux moyen (colonne en gras), on peut dire qu'une valeur ponctuelle sera correcte à un facteur 5 près (en multiplication ou en division).

Flux NH4 en kg/jour	Haute fréquence			Basse fréquence : à partir des mesures mensuelles	Facteur correctif
	Flux moyen F_m	Intervalle contenant 95% des valeurs		Flux basse fréquence F_{BF}	F_m / F_{BF}
		Borne mini.	Borne maxi.		
Septembre 2010	4.3	1.0	23.5	4.3	1.0
Octobre 2010	7.8	1.8	34.2	0.86	9.1
Janvier 2011	8.6	4.3	18.9	12.1	0.7
Février 2011	6.0	1.1	22.0	2.6	2.3

Tableau synthétique des résultats pour l'ammonium.

On note :

- En général, la mesure ponctuelle basse fréquence mensuelle tombe dans l'intervalle contenant 95% des valeurs (seule exception, octobre 2010).
- Le facteur correctif varie de 0.7 à 9.1 ; on peut dire que les mesures ponctuelles mensuelles basses fréquences étaient correctes à un facteur 9 près.
- En général, étant données les valeurs des bornes en relation avec le flux moyen (colonne en gras), on peut dire qu'une valeur ponctuelle sera correcte à un facteur 5.5 près (en multiplication ou en division).

Flux PO4 en kg/jour	Haute fréquence			Basse fréquence : à partir des mesures mensuelles	Facteur correctif
	Flux moyen F_m	Intervalle contenant 95% des valeurs		Flux basse fréquence F_{BF}	F_m / F_{BF}
		Borne mini.	Borne maxi.		
Septembre 2010	13.0	5.3	35.4	14.7	0.9
Octobre 2010	25.9	7.8	86.0	5.2	5.0
Janvier 2011	25.1	11.3	38.9	19.9	1.3
Février 2011	18.1	10.0	44.5	5.2	3.5

Tableau synthétique des résultats pour le phosphate.

On note :

- La mesure ponctuelle basse mensuelle tombe dans l'intervalle contenant 95% des valeurs dans seulement 2 cas, en septembre 2010 et janvier 2011.
- Le facteur correctif varie de 0.9 à 5 ; on peut dire que les mesures ponctuelles mensuelles étaient correctes à un facteur 5 près.
- En général, étant données les valeurs des bornes en relation avec le flux moyen (colonne en gras), on peut dire qu'une valeur ponctuelle sera correcte à un facteur 3.3 près (en multiplication ou en division).

Flux COT en kg/jour	Haute fréquence			Basse fréquence : à partir des mesures mensuelles	Facteur correctif
	Flux moyen F _m	Intervalle contenant 95% des valeurs		Flux basse fréquence F _{BF}	F _m / F _{BF}
		Borne mini.	Borne maxi.		
Septembre 2010	86.4	19.0	235	512	0.17
Octobre 2010	411	28.8	1508	403	1.0
Janvier 2011	396	7.92	1188	563	0.7
Février 2011	181	9.05	1095	91.6	2.0

Tableau synthétique des résultats pour le carbone organique total.

On note :

- En général, la mesure ponctuelle basse fréquence mensuelle tombe dans l'intervalle contenant 95% des valeurs (seule exception, septembre 2010).
- Le facteur correctif varie de 0.17 à 2 ; on peut dire que les mesures ponctuelles mensuelles étaient correctes à un facteur 6 près.
- En général, étant données les valeurs des bornes en relation avec le flux moyen (colonne en gras), on peut dire qu'une valeur ponctuelle sera correcte à un facteur 50 près (en multiplication ou en division), ce qui est une incertitude assez importante.

Résumé très synthétique : les mesures ponctuelles effectuées de façon mensuelle sont correctes en ce qui concerne leur ordre de grandeur, c'est-à-dire en général à un facteur 10 près (en multiplication ou division).

I. Introduction

Le Wimereux est un petit fleuve côtier situé dans le département du Pas-de-Calais. La longueur de son cours d'eau est de 22.1 km. Ce fleuve prend sa source à Colembert, traverse la ville de Wimille avant de se jeter dans la Manche à Wimereux. Le régime hydrologique du cours d'eau varie saisonnièrement et est lié aux précipitations. La Figure 1a représente une année typique de débits journaliers (l'année 1998) et la Figure 1b représente la climatologie (moyenne journalière le long de l'année) du débit mesuré à Wimille. On voit que pendant l'étiage en été le débit est très faible, tandis qu'il devient bien plus important en fin d'automne et en hiver. Ce cours d'eau montre des signes de pollution avec un apport important en nitrate dû aux rejets domestiques et industriels (Lefebvre, 2008). Ces pollutions dues à un enrichissement en sels nutritifs et en matière organique favorisent généralement la prolifération algale sur le littoral (Gentilhomme et Lizon, 1998). Les blooms de *phaeocystis* sont fréquemment rencontrés en aval de ce fleuve (Lefebvre et Delpech, 2004).

Des mesures à haute fréquence des paramètres biogéochimiques ont été effectuées par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie durant deux campagnes, réalisées à deux moments différents du cycle saisonnier. La première campagne s'est déroulée du 15 septembre au 11 octobre 2010 et la seconde du 18 janvier au 14 février 2011 (indiquées en trait bleu horizontal sur la figure 1b). La présente étude a pour principal objectif l'analyse des paramètres biogéochimiques mesurés à haute fréquence (toutes les 10 minutes) pendant ces deux campagnes. Cette étude vise à caractériser les flux des différents paramètres et leur variabilité ; elle est focalisée sur l'étude des nitrates (NO_3), du phosphate (PO_4), de l'ammonium (NH_4) et du carbone organique total (COT).

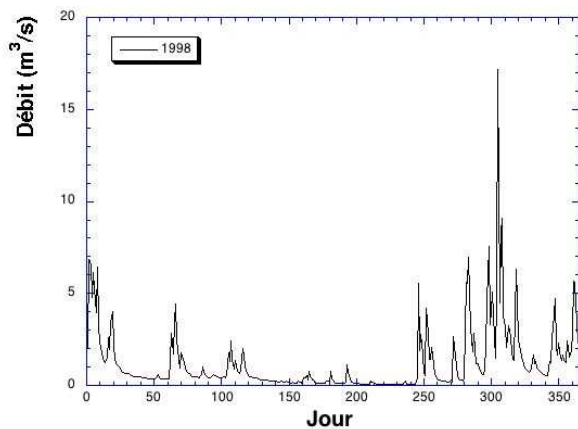


Figure 1a. Evolution du débit du Wimereux pendant une année typique (ici 1998).

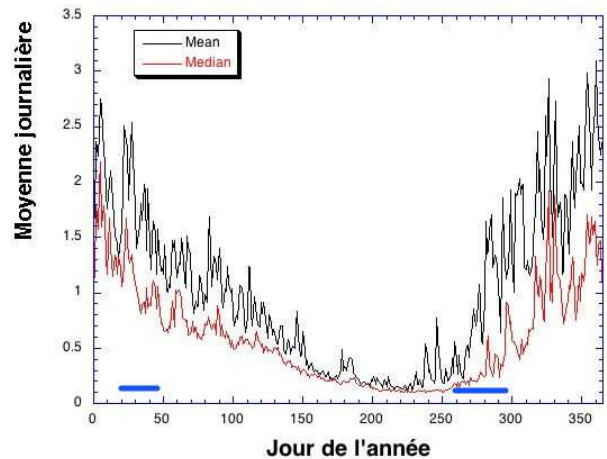


Figure 1b. La climatologie (moyenne journalière et médiane journalière) du débit pour chaque jour de l'année, estimée à partir des données 1981-2006.



Figure 2. Localisation de la station de mesure (point rouge) sur le Wimereux, dans la ville de Wimille en amont de la ville de Wimereux.

II. Matériels et Méthode

Dans cette étude, nous disposons de 2 bases de données, l'une à haute fréquence et l'autre à basse fréquence.

➤ Mesures ponctuelles à haute fréquence

Plusieurs paramètres physiques et chimiques ont fait l'objet d'un suivi au cours de deux campagnes : du 15 septembre au 11 octobre 2010 et du 18 janvier au 14 février 2011. La température, le débit, le pH, l'oxygène dissous, la turbidité, le carbone organique total (COT), le phosphate (PO_4), l'ammonium (NH_4) et le nitrate (NO_3) ont été mesurés à haute fréquence (toutes les 10 minutes) en un point fixe. Les mesures ont été réalisées sur le Wimereux à la station Wimille par une station mobile de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie installée sur le parking de la mairie de Wimille (voir la Figure 2).

➤ Mesures à basse fréquence

Les mesures de débit basse fréquence ont été réalisées au niveau de la station hydrologique de Wimille par la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) Nord/Pas-de-Calais. Les échantillonnages sont réalisés de manière mensuelle à la station Wimille et le point de collecte correspond à la station de mesure de l'Agence de l'Eau¹. Le Tableau 1 ci-dessous donne les périodes de mesures. Nous disposons des concentrations mensuelles de NO_3 , de NH_4 , de PO_4 et de COD. Nous ne disposons pas de la concentration en COT (carbone organique total) à basse fréquence. Les données COD peuvent toutefois être converties en concentrations COT sous réserve de disposer d'un jeu de calibration suffisant.

¹ Au point 91.000 correspondant au réseau de contrôle opérationnel.

Tableau1 : période de mesures pour les concentrations basse fréquence (mesures mensuelles) et haute fréquence.

Mesures basse fréquence				Haute fréquence	
Septembre 2010	Octobre 2010	Janvier 2011	Février 2011	15 Septembre au 11 octobre 2010	18 Janvier au 14 février 2011
Concentration et débit mensuels				Concentration et débit toutes les 10 minutes	

Problématique

Les flux sont théoriquement définis à micro-échelle. Le flux instantané est le produit de deux quantités mesurées ponctuellement. En fait, le plus souvent, en l'absence de mesures simultanées en continu des concentrations et des débits, on n'a pas accès au flux instantané. Les mesures de concentrations sont donc en général effectuées de façon mensuelle, et ceci couplé à des mesures journalières du débit, fournit une **approximation « basse fréquence » du flux**. Etant donné que les débits tout autant que les concentrations présentent des fortes fluctuations, une estimation basse fréquence et ponctuelle est potentiellement assez fortement biaisée par rapport au flux réel (c'est-à-dire la moyenne du flux instantané). Ici nous allons donc utiliser des données provenant de deux campagnes à haute fréquence pour estimer le flux instantané « réel » et sa moyenne, et comparer ceci au flux « basse fréquence » obtenu par ailleurs.

Notre méthodologie est la suivante:

- estimer les flux de ces nutriments à haute fréquence et leur histogramme et valeur moyenne ;
- évaluer l'incertitude liée à ces estimations de flux ;
- comparer cette vraie estimation et son intervalle de confiance à la valeur approximative donnée par l'estimation « basse fréquence ».

A. Site d'étude : paramètres physico-chimiques mesurés

Débits. Les deux campagnes de mesures réalisées en un point fixe et à haute fréquence sur le Wimereux indiquaient au mois de septembre à octobre un débit moyen de $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$ (sur la période allant du 15 septembre au 11 octobre 2010) comparée à la campagne de janvier à février où le débit moyen s'élevait à $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$. Comme l'indique la climatologie (Figure 1b), les plus forts débits sont mesurés en hiver, et au début de l'automne les débits sont en moyenne plus faibles. La figure 3 représente l'évolution haute fréquence du débit au cours des deux campagnes. Durant la première campagne, le débit varie entre 0.07 et $1.71 \text{ m}^3/\text{s}$ et au cours de la seconde campagne, il varie de 0.40 à $8.41 \text{ m}^3/\text{s}$. La représentation graphique en Figure 1a montre la forte variabilité des débits au cours d'une année, avec des mesures journalières ; ceci est confirmé ici pour les deux périodes à haute fréquence représentées en figure 3. La comparaison des distributions de débits selon la période de mesure est représentée par des boîtes à moustaches (Figure 4). On note une différence de débit entre les deux périodes : la médiane est de $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ en automne contre $0.99 \text{ m}^3/\text{s}$ en hiver, le premier quartile (Q1) est de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en automne et de $0.63 \text{ m}^3/\text{s}$ en hiver. Ces boîtes à moustaches indiquent également une distribution asymétrique des débits.

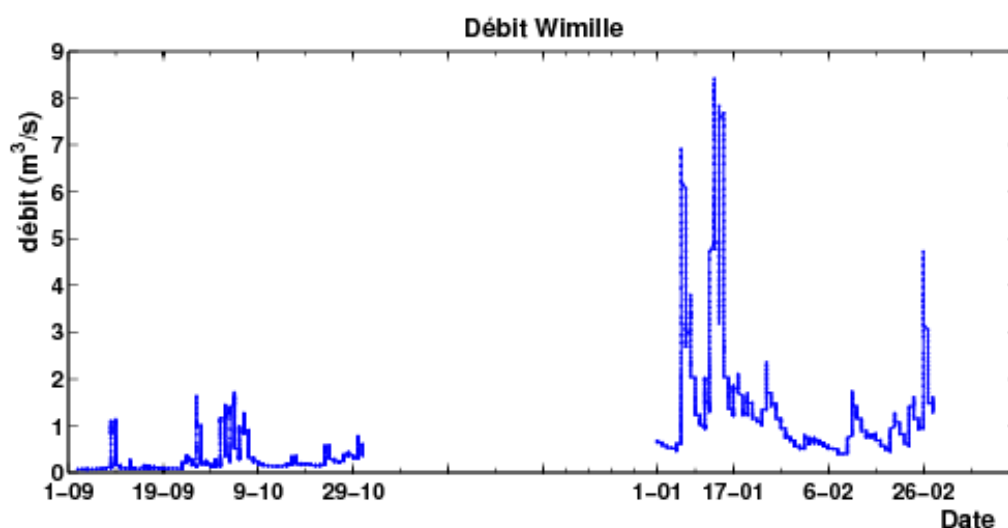


Figure 3. Evolution mensuelle du débit à Wimille toutes les 10 minutes pendant les deux périodes de mesure.

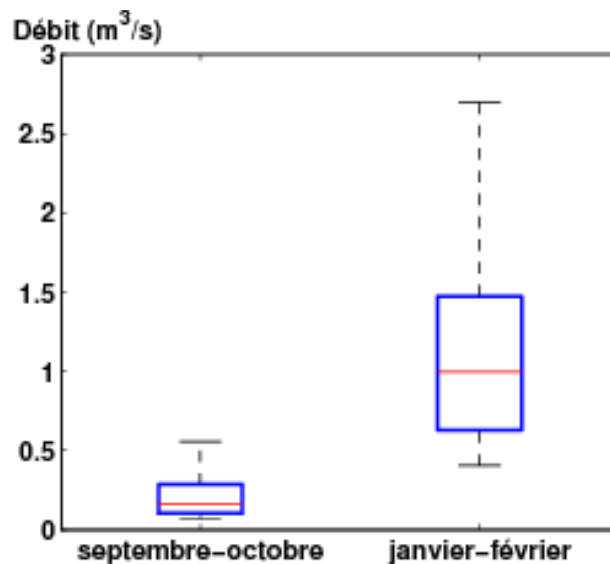


Figure 4. Représentation en boîte à moustaches des valeurs du débit mesurées durant les deux campagnes à haute fréquence. Le trait rouge représente la médiane et les limites bleues de la boîte sont les 25^{ème} et 75^{ème} quantiles (1^{er} et 3^{ème} quartiles). 50% des valeurs sont incluses dans la « boîte ».

Température. Durant la période d'étude, le Wimereux est caractérisé par des températures plus élevées en automne (septembre-octobre) comparées à celles enregistrées en hiver (janvier-février). Le maximum de température enregistrée entre septembre et octobre s'élevait à 17.06 °C et celle enregistrée entre janvier et février était de 10.75 °C. La figure 5a montre une distribution de la température et une différence de température clairement visible via ces deux boîtes à moustaches : la médiane est de l'ordre de 14.56 °C en automne (campagne 1) et de 7.81°C en hiver (la campagne 2). Les premier (Q1) et troisième quartiles (Q3) qui correspondent aux valeurs inférieures et supérieures des boîtes à moustaches respectivement sont de l'ordre de 13.87 °C et de 15.38 °C en automne contre 6.50 °C et 8.69 °C en hiver respectivement.

pH. Le pH mesuré varie de 7.88 à 8.63 UpH en automne et de 8.25 à 8.50 UpH en hiver. Les boîtes à moustaches représentent la distribution du pH et indiquent une différence entre les deux périodes de mesure ; la médiane est de 8.48 UpH en automne contre 8.34 UpH en hiver (Figure 5b).

Oxygène dissous. Les valeurs d'oxygène dissous (OD) varient entre 0.57 et 10.38 mg/l en automne et en hiver elles varient entre 9.85 et 15.87 mg/l. la concentration moyenne d'OD est de 8.45 mg/l en automne et de 11.81 mg/l en hiver. Les boîtes à

moustaches de l'OD (Figure 5c) montrent une différence de concentration en OD entre les deux périodes de mesure. On remarque également une distribution asymétrique d'OD durant les deux campagnes.

Turbidité. Les concentrations de turbidité obtenues montrent que les distributions semblent similaires pour les deux périodes de mesure (Figure 5d).

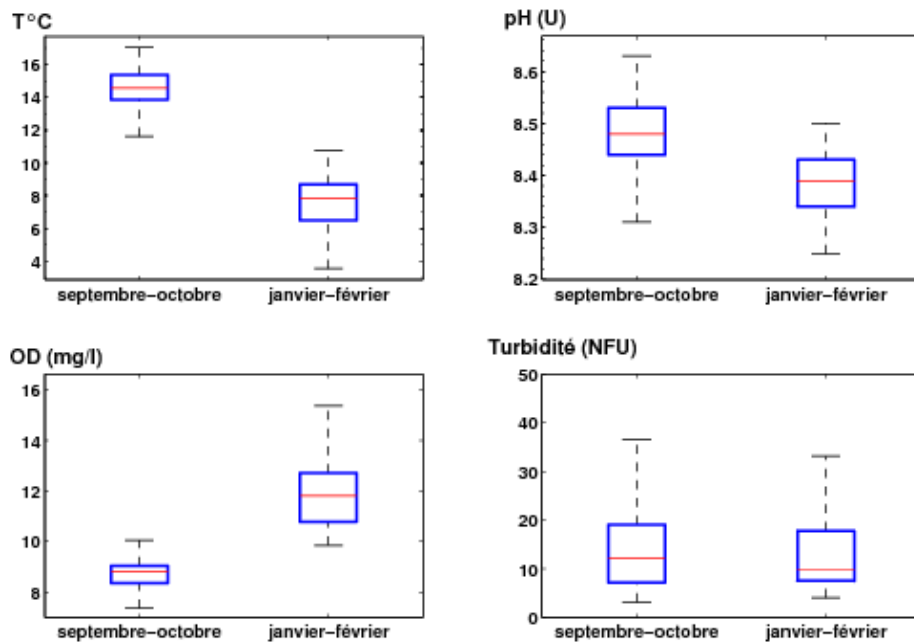


Figure 5. Représentation en boîte à moustaches de la température, du pH de l'OD et de la turbidité durant les deux campagnes à haute fréquence. Le trait rouge représente la médiane et les limites bleues de la boîte sont les 25^{ème} et 75^{ème} quantiles (1^{er} et 3^{ème} quartile). 50% des valeurs sont incluses dans la « boîte ».

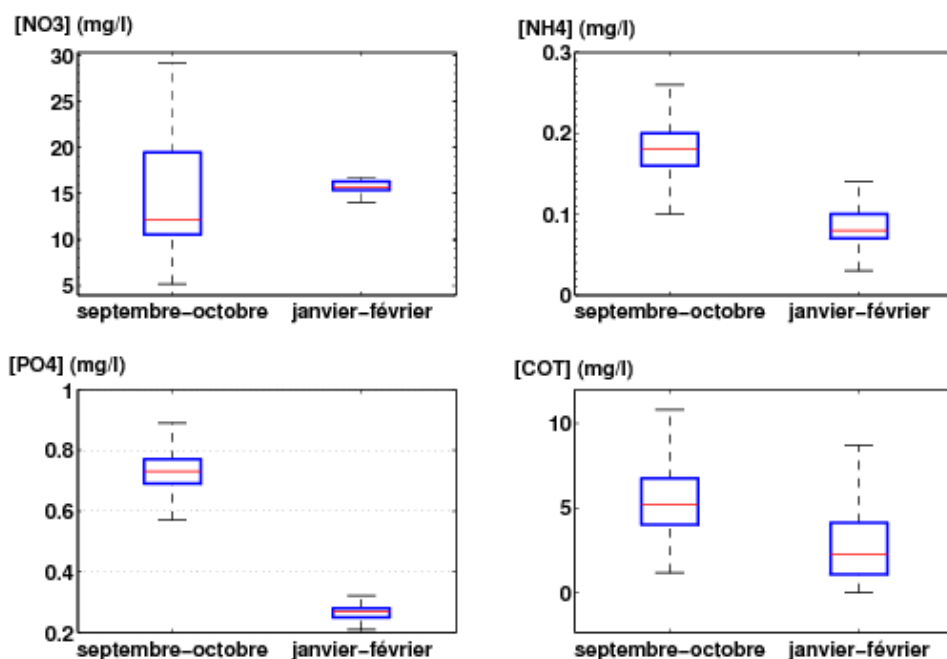


Figure 6. Représentation en boîte à moustaches de NO_3 , de NH_4 de PO_4 et de COT durant les deux campagnes. Le trait rouge représente la médiane et les limites de la boîte bleues sont les 25^{ème} et 75^{ème} quantiles (en bleu). 50% des valeurs sont inclus dans la « boîte ». On note un décalage entre les boîtes. On remarque également que les valeurs de concentration de chaque paramètre en automne sont plus élevées que celle enregistrées en hiver.

Pour conclure sur l'évolution de ces paramètres biogéochimiques mesurés au cours de ces deux campagnes, on constate qu'en général, la période de faibles débits est caractérisée par une température et un pH, plus élevés comparés à la période de forts débits. Seule l'évolution d'OD montre le contraire, indiquant donc que les eaux de Wimereux sont mieux oxygénées durant la période de forts débits.

Nutriments. La comparaison des distributions de chaque nutriment (NO_3 , NH_4 , PO_4 et COT) selon la saison est représentée en figure 6. Les distributions sont asymétriques. Une différence entre les saisons est bien visible pour chacun des paramètres. L'écart interquartile (premier quartile (Q1) – troisième quartile (Q3)) est plus étalé pour la saison d'automne (septembre à octobre) que pour la saison d'hiver (janvier à février) pour les nitrates.

B. Méthodologie : calcul du flux de nutriments

Le flux correspond à la quantité de matière traversant une surface perpendiculaire à l'écoulement de la rivière, pendant une période donnée. Il se calcule en effectuant le produit du débit de la rivière par la concentration en matière. Comme à la fois le débit et la concentration sont très fluctuants, la valeur « vraie » théorique, est le flux instantané, défini à petite échelle. Dans notre étude, le flux de nutriments est calculé en multipliant la concentration à haute fréquence en sels nutritifs (nutriments) par le débit à haute fréquence de la rivière :

$$F = \text{Débit} \times \text{Concentration} \quad (1)$$

$$g \, s^{-1} = m^3 s^{-1} \times mg \, l^{-1}$$

F est le flux en g/s, le débit de la rivière est en $m^3 s^{-1}$ et la concentration de chaque paramètre en mg/l. Les calculs du flux ont été réalisés sur quatre périodes (septembre 2010, octobre 2010, janvier 2011 et février 2011). Comme nous l'avons mentionné plus haut, nous disposons de deux bases de données : la basse fréquence (1 donnée par mois) et la haute fréquence (toutes les 10 minutes). Pour les données à haute fréquence, le « flux haute fréquence moyen » est obtenu en moyennant les flux instantanés pour chacune des périodes de mesure. Le flux à haute fréquence est comparé aux « flux basse fréquence » calculés à partir des mesures mensuelles de débit et de concentration.

Notons $\bar{X}$ et $\bar{Q}$ les quantités à basse fréquence. Le flux à basse fréquence est

$$F_{BF} = \bar{X}\bar{Q} \quad (2)$$

D'un autre côté, le flux moyen « exact » est celui calculé à haute fréquence $F(t) = X(t)Q(t)$. Sa moyenne s'écrit :

$$\bar{F} = \overline{XQ} \quad (3)$$

Rappelons que, en théorie des probabilités, on a $\overline{AB} = \bar{A}\bar{B}$ (la moyenne du produit est le produit des moyennes) uniquement pour des variables aléatoires **non corrélées**. Ici, une concentration et le débit en général sont corrélés. Pour vérifier ceci, on estimera systématiquement le rapport R défini par :

$$R = \frac{F_{BF}}{F} = \frac{\bar{X}\bar{Q}}{\bar{XQ}} \quad (4)$$

Ce rapport est le rapport du flux basse fréquence et du flux moyen réel. Si le rapport est proche de 1, cela veut dire que la mesure basse fréquence était suffisante. Si R est très différent de 1, cela veut dire que les corrélations existent et que le flux basse fréquence n'est pas représentatif.

Ensuite, on s'intéresse aussi à la dispersion du rapport, c'est-à-dire une quantité qui donnera accès à l'intervalle de confiance. Pour cela on considère la nouvelle variable aléatoire normalisée :

$$\rho = \frac{X(t)Q(t)}{\bar{XQ}} \quad (5)$$

On a clairement $\bar{\rho} = R$. L'étude de la densité de probabilité de ρ , nous permettra de mieux comprendre la répartition instantanée du rapport entre flux instantané et flux moyen (basse fréquence).

III. Résultats

A. Flux de nitrate (NO₃) en rivière

Septembre et octobre 2010.

Le flux haute fréquence calculé pour chaque période de mesure est représenté dans le tableau 2 (données en Annexe). Le flux au mois de septembre 2010 (données à haute fréquence) est de l'ordre de 1.98 ± 1.89 gNO₃/s. Le calcul réalisé du 17 au 30 septembre 2010 montre également la variabilité du flux (figure 7a). La moyenne du flux à haute fréquence est de l'ordre de 1.98 gNO₃/s et cette valeur moyenne est très proche de celle mesurée à basse fréquence (le flux du 24 septembre 2010 : 1.99 gNO₃/s). La mesure mensuelle est représentée en pointillé sur la figure 7a et on note une variabilité importante autour de cette valeur mensuelle. Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) au mois de septembre est égal à 1. La densité de probabilité (pdf) du flux possède une distribution asymétrique (figure 7b).

Le flux moyen au mois d'octobre 2010 est plus élevé : 10.97 ± 9.17 gNO₃/s. La figure 7c représente l'évolution du flux de nitrate (NO₃) calculé à partir de la concentration et du débit du 1 au 10 octobre 2010 à haute fréquence. Le flux instantané de NO₃ indique une augmentation suivie d'une baisse durant cette période. La valeur mensuelle mesurée le 22 octobre est représentée en pointillé sur la figure 7c (2.02 gNO₃/s) et on remarque que la majorité des valeurs à haute fréquence sont très éloignées de cette valeur à basse fréquence. Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) au mois d'octobre est différent de 1 (0.18). La pdf du flux en figure 7d met en évidence une distribution asymétrique.

Sur les deux mois, le flux mensuel moyen de NO₃ à haute fréquence de septembre à octobre 2010 est de l'ordre de 4.94 g/s.

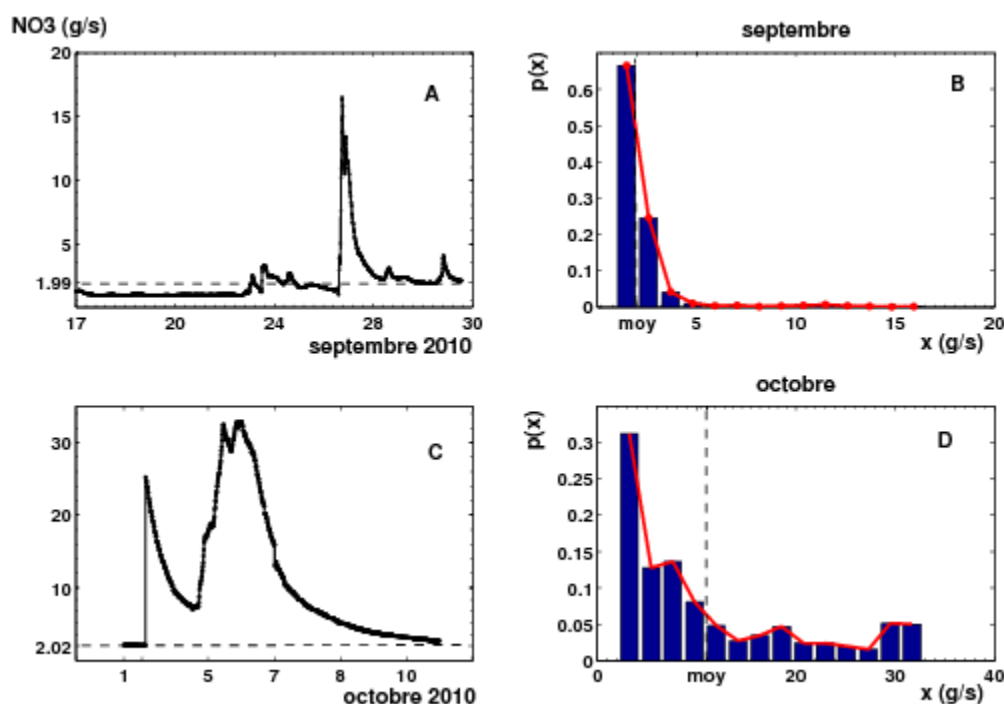


Figure 7. A gauche : les flux instantanés de NO₃ : évolution de ce flux en gramme par seconde durant les mois d'octobre et de septembre ; A droite : densités de probabilité (pdf) du flux de NO₃ durant ces deux mois possédant une distribution asymétrique.

Janvier et février 2011.

Les calculs du flux ont été effectués pour les mois de janvier et de février 2011 (voir Figure 8 et Tableau 2). Le flux moyen en janvier estimé à partir des données à haute fréquence est de 19.15 gNO₃/s (Tableau 2) et le flux en janvier à basse fréquence est de 21.59 g/s (voir annexe). On note également une variabilité non négligeable du flux durant ce mois de janvier (figure 8a) et le taux de flux entrant tend à baisser vers la fin du mois de janvier jusqu'aux premiers jours du mois de février (figure 8a et 8c). Le flux mensuel à basse fréquence est représenté en pointillé sur la figure 8a, on note une variabilité importante autour de cette valeur mensuelle. Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) au mois de janvier est proche de 1 (1.13).

Le flux moyen calculé au mois de février (pour des données à haute fréquence) est de 10.88 gNO₃/s et le flux calculé à basse fréquence est estimé à 6.25 gNO₃/s. Cette valeur à basse fréquence est représentée sur la figure 8a et on note une variabilité non négligeable des valeurs à haute fréquence autour de cette valeur à basse fréquence. Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la

moyenne à haute fréquence : tableau 6) calculé est différent de 1 (0.57) durant ce mois de février.

Les distributions de ces flux à haute fréquence au cours de ces deux mois possèdent une distribution asymétrique (Figure 8b et 8d). Le flux mensuel moyen sur deux mois de janvier à février 2011 est de l'ordre de 13.09 gNO₃/s.

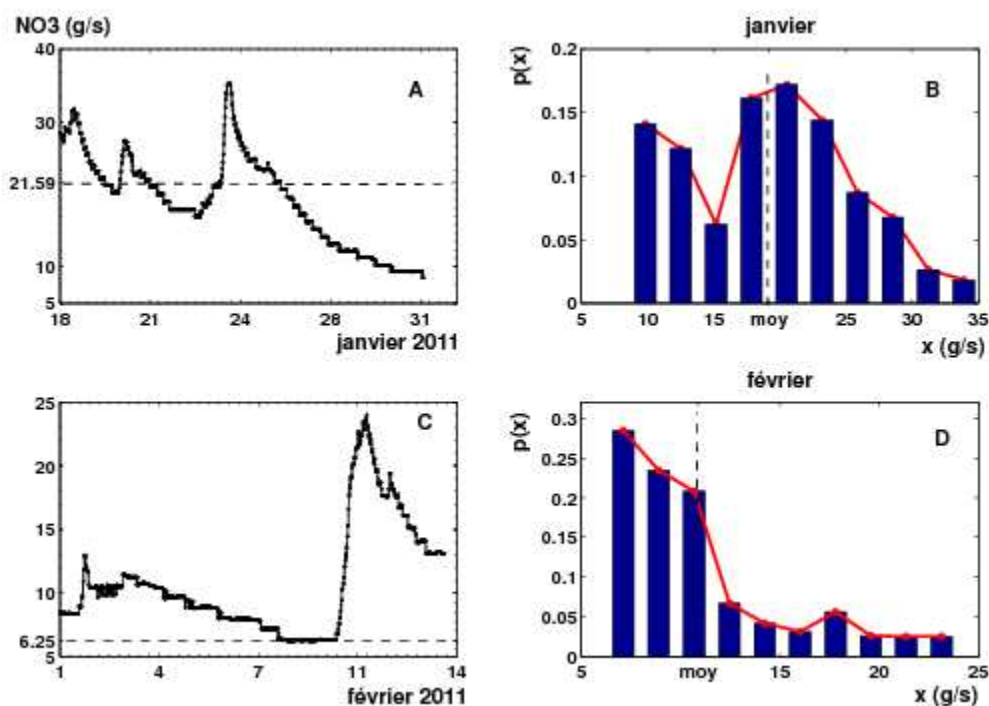


Figure 8. Gauche : le flux de NO₃ : évolution de ce flux en gramme par seconde durant les mois de janvier et de février ; droite : densités de probabilité (pdf) du flux de NO₃ durant ces deux mois.

Tableau 2 : moyenne, médiane et STD du flux de NO₃ et le débit moyen durant chaque mois

Flux NO ₃ (g/s)	Haute fréquence			Basse fréquence : moyenne mensuelle
	moyenne	médiane	STD	moyenne
septembre	1.98	10.69	1.89	1.99
octobre	10.97	7.43	9.17	2.02
janvier	19.15	19.61	6.36	21.59
février	10.88	9.73	4.31	6.25
septembre-octobre	4.94	2.21	6.92	
janvier-février	15.10	13.13	6.84	
Débit (m ³ / s)	Haute fréquence	Basse fréquence : moyenne mensuelle		
	moyenne	moyenne		
septembre	0.18	0.3		
octobre	0.45	0.16		

janvier	1.20	1.51
février	0.72	0.41
septembre-octobre	0.22	
janvier-février	1.33	

Relation avec le débit.

La figure 9 représente la concentration et le flux de NO₃ en fonction du débit durant les mois de septembre, d'octobre, de janvier et de février. La première illustration (Figure 9a) concerne la relation entre la concentration et le débit pour les 4 périodes de mesure et visuellement on remarque que les fortes concentrations de NO₃ sont mesurées en octobre et les plus faibles concentrations en septembre. Les valeurs de concentrations en janvier et en février sont comprises entre celles d'octobre et de septembre. On note également une corrélation assez faible entre la concentration en NO₃ et le débit (fort éparpillement des points).

Quant à la relation entre le flux de NO₃ et le débit durant ces mêmes périodes (Figure 9b), on note une relation approximativement linéaire avec des valeurs de corrélation r^2 de 0.86 en automne et de 0.99 en hiver. Comme on s'y attend, on note donc que plus le débit est important, plus le flux est important.

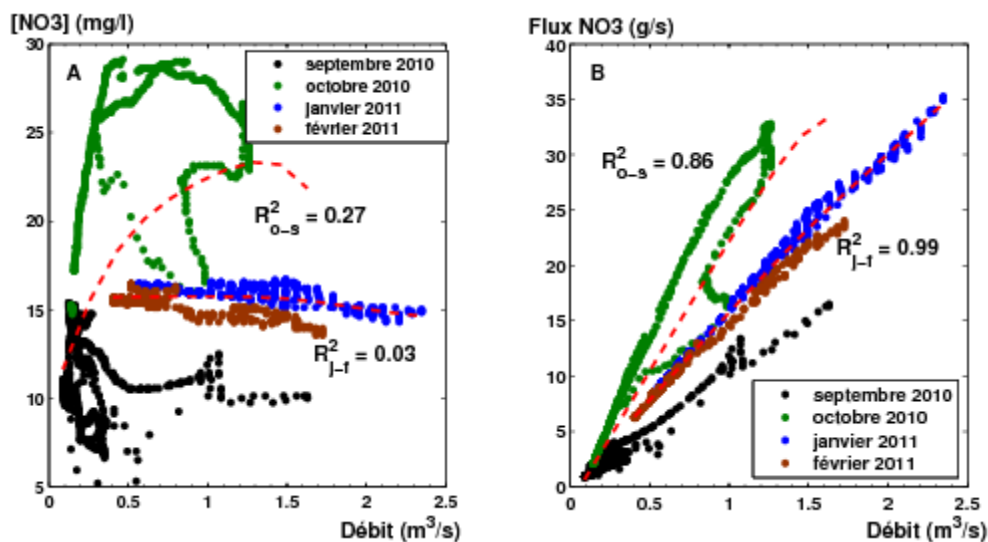


Figure 9. La concentration en NO₃ et le flux de NO₃ représentés en fonction du débit.

B. Flux d'ammonium (NH₄) en rivière

Septembre et octobre 2010.

Le flux de NH₄ à haute fréquence indique une forte variabilité (Figures 10 et 11) et le flux en rivière le plus élevé a été trouvé au cours du mois de septembre 2010 (avec un flux maximal de 1.23 gNH₄/s). En octobre, le flux de NH₄ à haute fréquence varie de 0.02 g/s à 0.70 g/s.

Le flux moyen de NH₄ calculé à haute fréquence au cours de ce mois est de l'ordre de 0.05 g/s identique à la valeur du flux moyen à basse fréquence (Tableau 3). Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) calculé au mois de septembre est donc égal à 1 même si on remarque une variabilité importante des valeurs à haute fréquence autour de cette valeur mensuelle à basse fréquence (Figure 10a).

Concernant les mesures faites au mois d'octobre 2010, le flux moyen de NH₄ calculé à haute fréquence est de l'ordre de 0.09 g/s alors que le flux à basse fréquence au même mois est de 0.01 g/s (Tableau 3). Dans cette figure 10c, on remarque que la valeur mensuelle à basse fréquence est très faible comparée aux valeurs à haute fréquence, et le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) est différent de 1 (0.15). Ces flux de NH₄ possèdent une distribution asymétrique visible en figures 11b et 11d.

Janvier et février 2011.

Au mois de janvier 2011, le flux moyen de NH₄ réalisé à haute fréquence est de 0.10 g/s comparé à la valeur moyenne à basse fréquence qui est de 0.14 g/s (Tableau 3). Le flux durant cette période montre une forte variabilité (Figure 11a) et varie de 0.04 à 0.33 gNH₄/s. La valeur mensuelle à basse fréquence est représentée en pointillé sur la figure 11a, on constate une forte variabilité du flux à haute fréquence autour de cette valeur basse fréquence. Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) calculé au cours de ce mois de janvier est différent de 1 (1.40).

Concernant le mois de février 2011, la valeur maximale du flux de NH₄ calculée à haute fréquence est de 1.23 g/s et le flux moyen calculé est estimé à 0.07 g/s. La valeur moyenne à basse fréquence (0.03 g/s) est plus faible que celle calculée à haute fréquence (Tableau 3). Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence

divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) au mois de février est différent de 1 (0.43). Ces flux de NH_4 possèdent une distribution asymétrique visible en figures 9B et 9D. Le flux mensuel moyen de NH_4 au mois de janvier à février 2011 est de l'ordre de 0.08 g/s.

Tableau 3 : moyenne, médiane et STD du flux de NH_4 durant chaque campagne

Flux NH_4 (g/s)	Haute fréquence			Basse fréquence : moyenne mensuelle
	moyenne	médiane	STD	moyenne
septembre	0.05	0.03	0.08	0.05
octobre	0.09	0.05	0.09	0.01
janvier	0.10	0.09	0.05	0.14
février	0.07	0.05	0.09	0.03
septembre-octobre	0.06	0.04	0.08	
janvier-février	0.08	0.07	0.07	

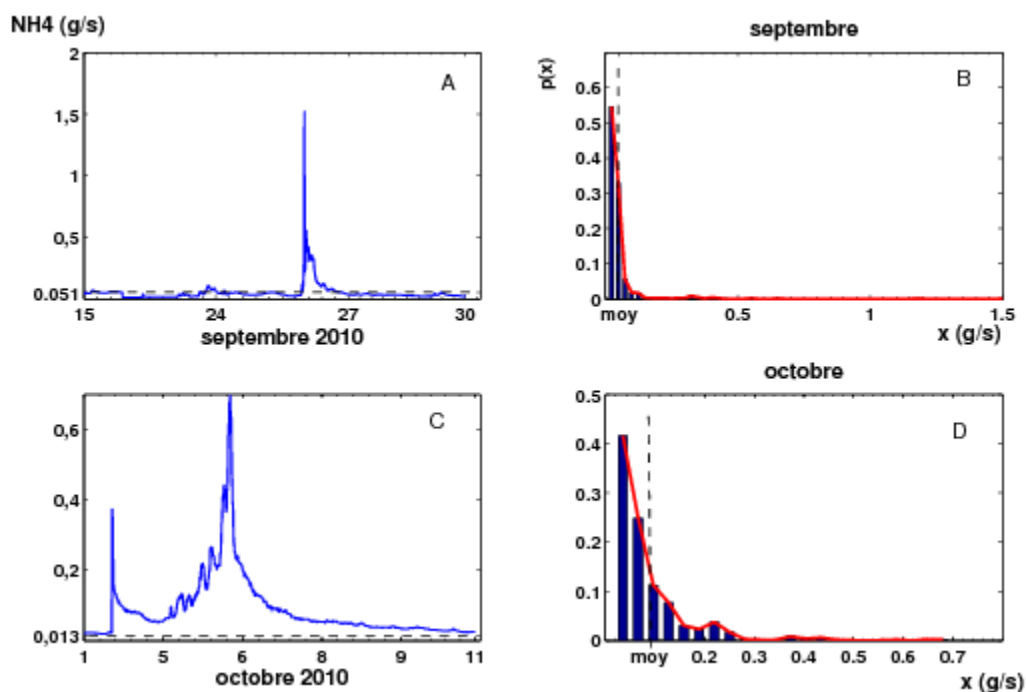


Figure 10. Gauche : le flux de NH_4 : évolution de ce flux en gramme par seconde durant les mois de janvier et de février ; droite : densités de probabilité (pdf) du flux de NH_4 durant ces deux mois, on constate une distribution asymétrique.

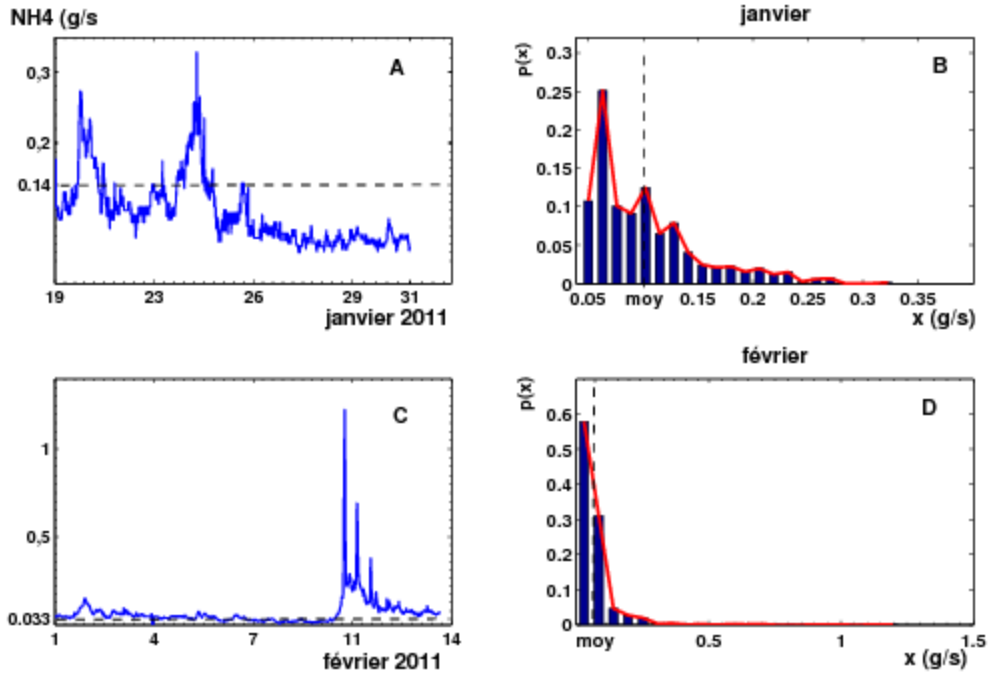


Figure 11. Gauche : le flux de NH4 : évolution de ce flux en gramme par seconde durant les mois de janvier et de février ; droite : densités de probabilité (pdf) du flux de NH4 durant ces deux mois.

Relation avec le débit.

La figure 12 présente la concentration et le flux de NH4 représentés en fonction du débit pour les deux saisons (automne et hiver) : on note une corrélation (r^2) très faible entre la concentration et le débit, et cela pour les deux saisons. Pour le flux représenté en fonction du débit, on note un coefficient de corrélation (r^2) de 0.64 en automne contre 0.42 en hiver.

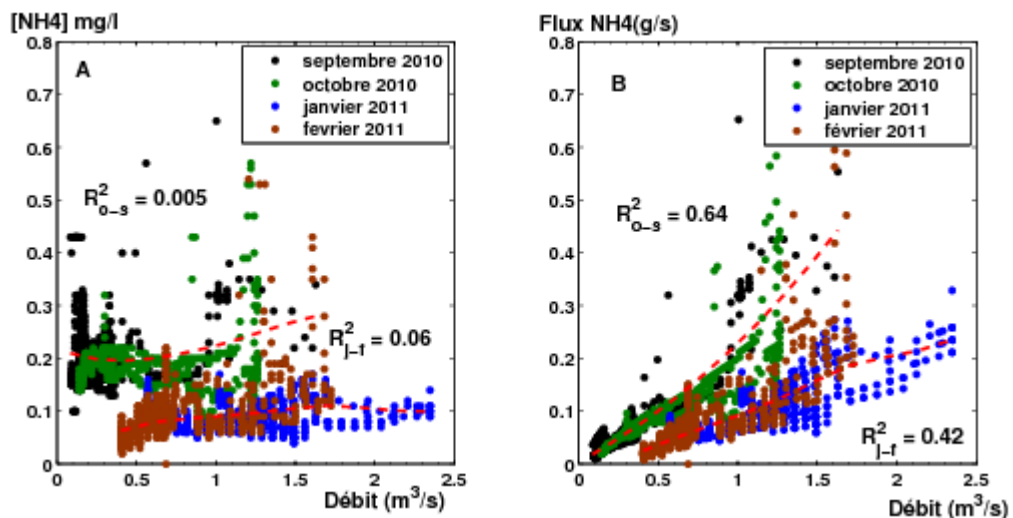


Figure 12. La concentration et le flux de NH4 représentés en fonction du débit.

C. Flux de phosphate (PO₄) en rivière

Septembre et octobre 2010.

Le flux moyen de PO₄ réalisé à haute fréquence au mois de septembre 2010 est de l'ordre de 0.15 g/s et l'évolution mensuelle du flux de PO₄ est illustrée en figure 13a. Le flux de PO₄ mesuré durant cette période montre une évolution variable avec des valeurs comprises entre 0.06 et 6.37 g/s. Le flux moyen à basse fréquence est légèrement supérieur à celui mesuré à haute fréquence (il est de l'ordre de 0.17 g/s) (Tableau 4). Cette valeur mensuelle est représentée sur la figure 13a : on note une variabilité non négligeable des valeurs à haute fréquence autour de cette valeur mensuelle (issue de la basse fréquence). Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) de ce mois de septembre est différent de 1 (1.13).

Pour le mois d'octobre, le flux moyen de PO₄ mesuré à haute fréquence est de 0.30 g/s et la moyenne à basse fréquence vaut 0.06 g/s (Tableau 4). Ce flux au cours du mois d'octobre 2010 varie de 0.08 à 4.37 g/s et l'évolution mensuelle du PO₄ à haute fréquence montre une variabilité assez importante autour de la valeur mensuelle à basse fréquence (Figure 13c). Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) au mois d'octobre est différent de 1 (0.20). La distribution du flux est représentée par sa probabilité de flux et les deux distributions en figures 13b et 13d possèdent une distribution unimodale avec de fortes probabilités pour les grandes valeurs.

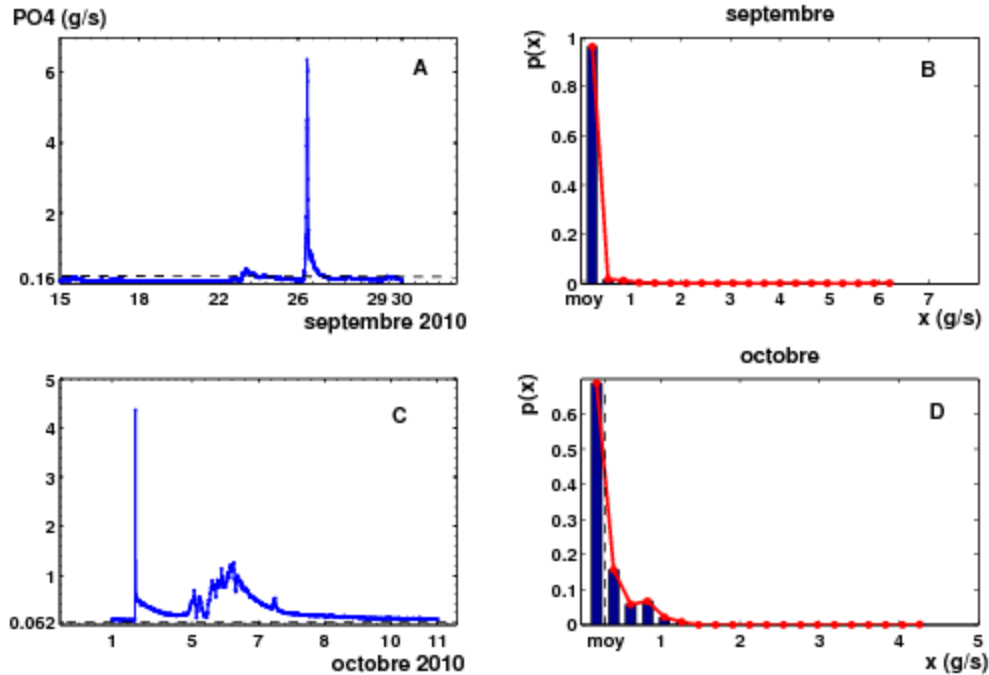


Figure 13. Gauche : le flux de PO4 : évolution de ce flux en gramme par seconde durant les mois de janvier et de février ; droite : densités de probabilité (pdf) du flux de PO4 durant ces deux mois.

Janvier et février 2011.

Pour la période de mesure de janvier 2011, le flux moyen de PO4 réalisé à haute fréquence au mois de janvier 2011 est de l'ordre de 0.29 ± 0.09 g/s (Tableau 4) alors que la valeur à basse fréquence est de 0.23 gPO4/s. Le flux de PO4 en janvier à haute fréquence est représenté en figure 14a et le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) est différent de 1 (0.79).

Au mois de février, le flux moyen de PO4 calculé à haute fréquence est de 0.21 g/s. La figure 14c montre une variabilité du flux de PO4 durant cette période et la valeur du flux mensuel semble très petite par rapport aux valeurs du flux à haute fréquence. Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence divisée par la moyenne à haute fréquence : tableau 6) au mois février est différent de 1 (0.28). Les flux à haute fréquence possèdent une distribution unimodale et bimodale avec de fortes valeurs vers la droite visible en figures 14c et 14d.

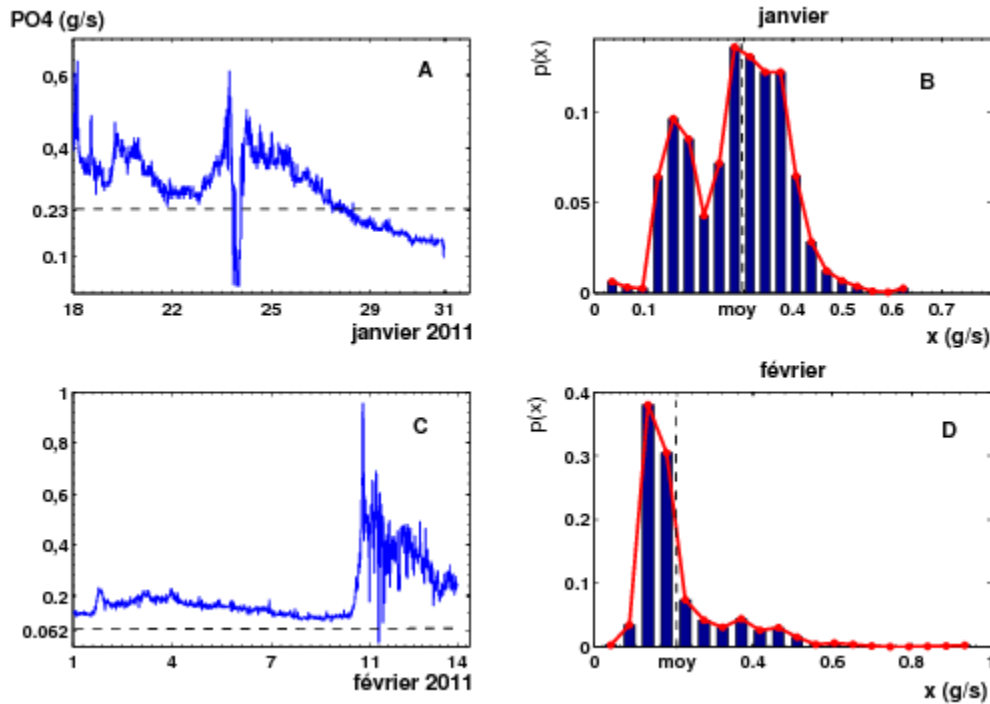


Figure 14. Gauche : le flux de PO₄ : évolution de ce flux en gramme par seconde durant les mois de janvier et de février ; droite : densités de probabilité (pdf) du flux de PO₄ durant ces deux mois ; on constate une distribution asymétrique.

Tableau 4 : moyenne, médiane et STD du flux de PO₄ durant chaque campagne

Flux PO ₄ (g/s)	Haute fréquence			Basse fréquence : moyenne mensuelle
	moyenne	médiane	STD	moyenne
septembre	0.15	0.01	0.34	0.17
octobre	0.30	0.19	0.28	0.06
janvier	0.29	0.29	0.09	0.23
février	0.21	0.17	0.12	0.06
septembre-octobre	0.20	0.12	0.33	
janvier-février	0.25	0.21	0.12	

Relation avec le débit.

Les figures 15a et 15b représentent la concentration et le flux de PO₄ en fonction du débit : on note deux groupes, celui de l'automne et celui de l'hiver. La relation entre la concentration et le débit semble très faible quelle que soit la saison alors que la relation entre le flux et débit indique une corrélation (r^2) de 0.66 et de 0.51 en automne et en hiver respectivement.

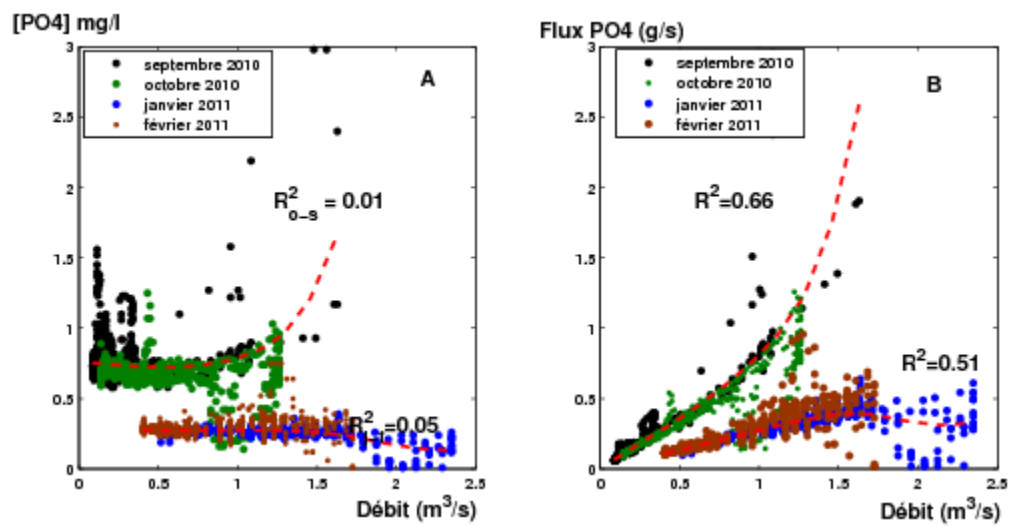


Figure 15. La concentration et le flux de PO4 représentés en fonction du débit.

D. Flux de carbone organique total (COT) en rivière

Septembre et octobre 2010.

Le flux de COT calculé à haute fréquence au mois de septembre 2010 est illustré en figure 16a et ce flux varie de 0.11 à 51.12 g/s de COT. Le flux moyen de COT est estimé à 1 g/s alors que le flux mensuel de COD (Carbone organique dissous) calculé est de 5.93 g/s (Tableau 5). Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence (COD) divisée par la moyenne à haute fréquence (COT) : tableau 6) calculé est différent de 1 (5.93), ceci explique que la totalité de COT correspond ici à la somme de COD (Carbone organique dissous) et de COP (Carbone Organique particulaire).

Le flux de COT calculé au mois d'octobre montre également une variabilité importante autour de la valeur à basse fréquence de COD (Figure 16c). Le flux moyen à haute fréquence est de l'ordre de 4.76 g/s tandis que le flux à basse fréquence calculé est de 4.67 g/s. Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence (COD) divisée par la moyenne à haute fréquence (COT) : tableau 6) est proche de 1 (0.98) ceci explique que le COD est représentatif du COT mesuré en octobre. Lorsqu'on s'intéresse à la distribution du flux de COT à haute fréquence on remarque que ce flux possède une distribution asymétrique (Figures 16b et d).

Janvier et février 2011.

Le flux de COT à haute fréquence au mois de janvier 2011 varie de 0.03 à 29.64 g/s avec une moyenne de 4.58 g/s alors que la valeur moyenne de COD à basse fréquence est de 6.52 g/s (Tableau 5). Le rapport R (valeur moyenne à la basse fréquence (COD) divisée par la moyenne à haute fréquence (COT) : tableau 6) est différent de 1 (1.42) et la figure 17a indique que les valeurs de flux de COT à haute fréquence montrent une forte variabilité autour de la valeur basse fréquence (de COD).

Au mois de février 2011, la valeur maximale de flux de COT calculé est de 23.06 g/s (Figure 15C). Le flux moyen à basse fréquence est représenté sur la figure 17c, on note que cette valeur est absente des données à haute fréquence après le 11 février. Le flux moyen de COT à haute fréquence est de 2.09 g/s et celle de la basse fréquence (COD) est de 1.06 g/s (Tableau 5). Le rapport R (valeur moyenne à la

basse fréquence (COD) divisée par la moyenne à haute fréquence (COT) : tableau 6) est différent de 1 (0.51).

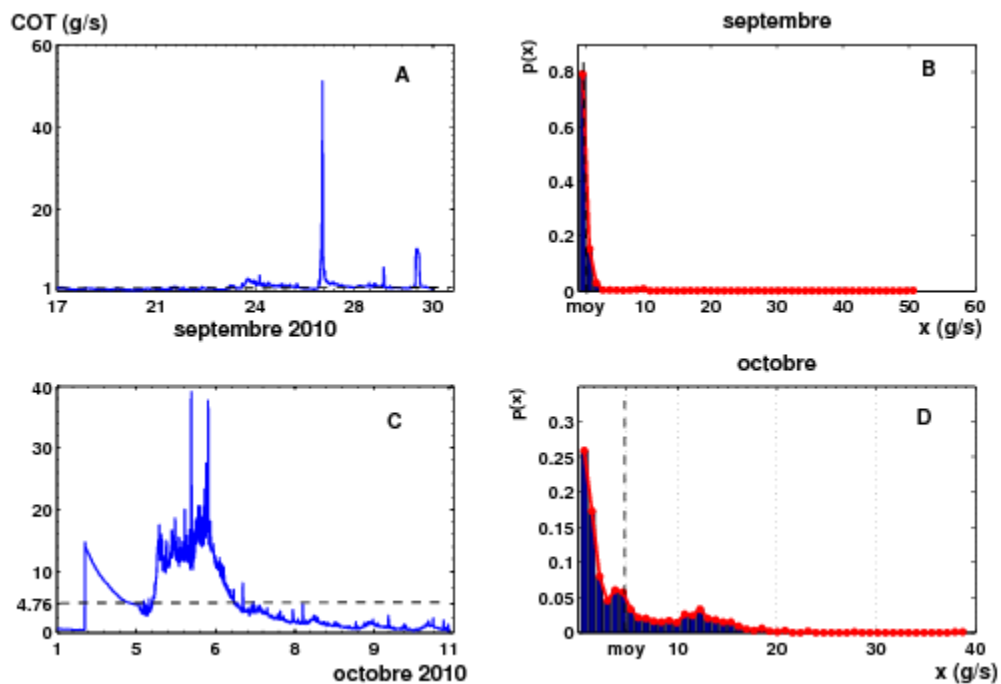


Figure 16. Gauche : le flux de COT : évolution de ce flux en g/s durant les mois de janvier et de février ; droite : densités de probabilité (pdf) du flux de COT durant ces deux mois.

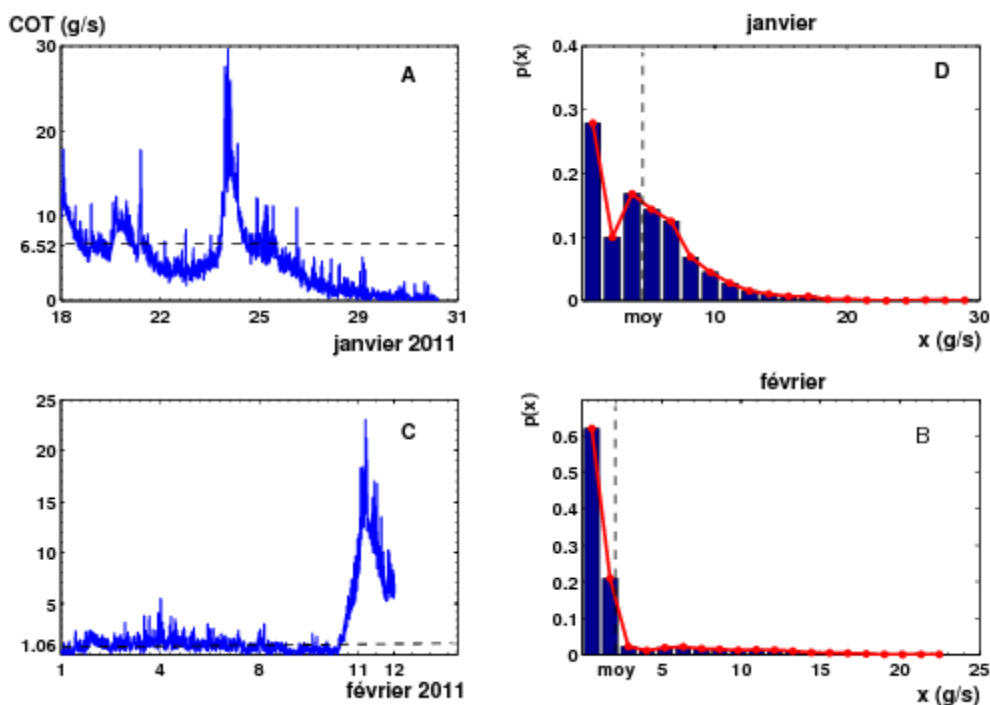


Figure 17. Gauche : le flux de COT : évolution de ce flux en g/s durant les mois de janvier et de février ; droite : densités de probabilité du flux de COT durant ces deux mois.

Tableau 5 : moyenne, médiane et STD du flux de COT durant chaque campagne

Flux COT (g/s)	Haute fréquence			Basse fréquence : moyenne mensuelle
	moyenne	médiane	STD	Moyenne de COD
septembre	1.00	0.63	2.01	5.93
octobre	4.76	2.35	5.18	4.67
janvier	4.58	4.07	3.85	6.52
février	2.09	0.90	3.32	1.06
septembre-octobre	2.29	0.87	3.88	
janvier-février	3.41	1.50	3.82	

Relation avec le débit.

La figure 18 montre la relation entre la concentration en COT et le flux (figure 18a) d'une part et d'autre part le lien entre le flux de COT et le débit (figure 18b). On observe deux groupes bien visibles en figure 18, celui de l'automne (septembre-octobre) et de celui de l'hiver (janvier-février). On note une relation non négligeable entre la concentration et le débit en hiver (Figure 18a). Une relation linéaire entre le flux et le débit est détectée au cours de ces deux saisons avec un coefficient de corrélation (r^2) de 0.83 et 0.80 en automne et en hiver respectivement (Figure 18b).

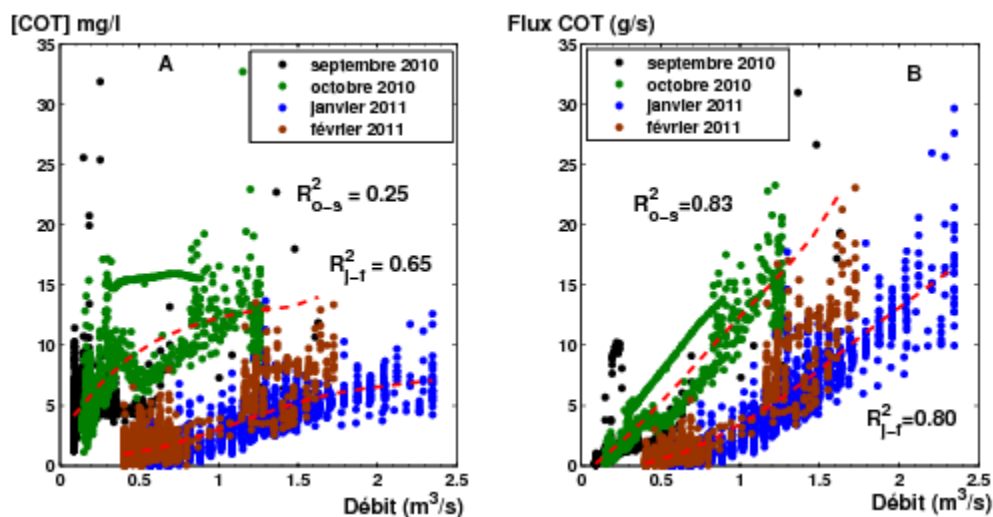


Figure 18. La concentration et le flux de COT en fonction du débit.

E. Intervalle de confiance autour de la valeur des flux mensuels

Pour une variable aléatoire, l'intervalle de confiance permet de connaître la marge d'erreur d'une valeur instantanée. Cette notion est la plus connue pour une variable normale, pour laquelle on donne généralement la moyenne m et l'écart-type σ . Ceci veut dire en fait que 68% des valeurs sont dans l'intervalle $[m-\sigma, m+\sigma]$, et 95% des valeurs dans l'intervalle $[m-2\sigma, m+2\sigma]$. Pour la suite, on conserve l'idée d'un intervalle contenant 95% des valeurs, mais on ne peut pas conserver l'approche gaussienne de la loi normale, car les analyses ont montré que les flux ne sont pas symétriques, donc ils n'ont pas une distribution normale.

Dans ce cas de distribution, l'intervalle de confiance à 95 % est calculé différemment, directement à partir de la distribution de probabilité. On estime la fonction de distribution cumulative (CDF) :

$$G(x) = \Pr(X \geq x) = \int_x^{+\infty} p(x) dx \quad (6)$$

Et la distribution de probabilité :

$$F(x) = \Pr(X \leq x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx \quad (7)$$

On a bien sûr $G(x) + F(x) = 1$. Ces fonctions $G(x)$ et $F(x)$ peuvent être estimées facilement à partir des données. Ensuite, on estime à partir de ces fonctions les deux bornes de l'intervalle de confiance :

$$x_{\min} = G(x) = 0.025$$

$$x_{\max} = F(x) = 0.025$$

Selon cette définition (Figure 19), l'intervalle $[x_{\min}, x_{\max}]$ contiendra 95% des valeurs. L'intervalle de confiance ici est donc directement estimé à partir des données, sans passer par la moyenne et l'écart-type. Nous calculons les distributions de flux normalisé ρ (avec $\rho = X(t)Q(t) / \overline{XQ}$) pour chaque paramètre (voir tous les calculs en annexe 2), et ensuite nous représentons la CDF ($G(x)$) et $F(x)$ de ρ et enfin déterminons les valeurs maximale à 2.5 % et minimale à 2.5 % d'erreur (voir figure 19).

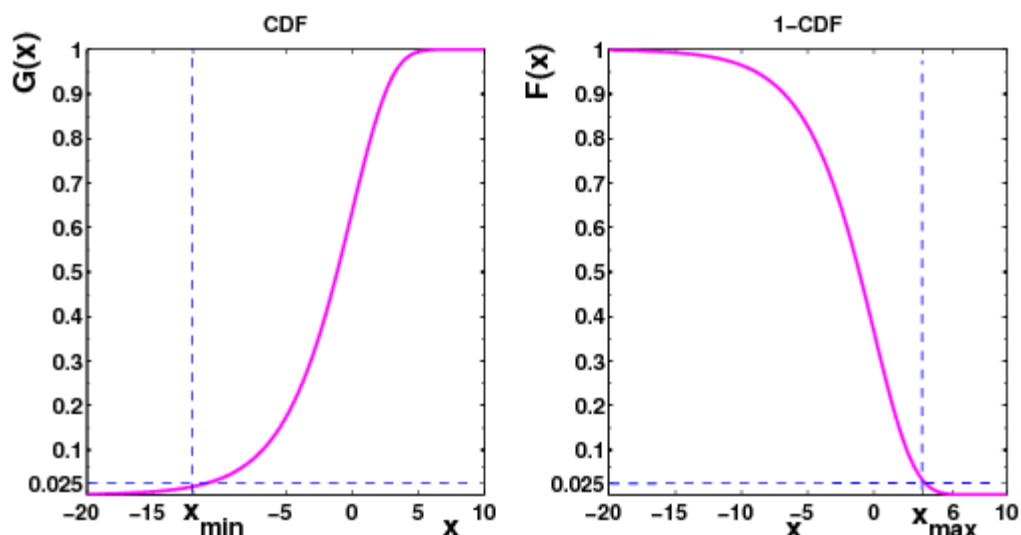


Figure 19. Fonction de distribution cumulative (CDF : $G(x)$) et la distribution de probabilité ($F(x)$). $x_{\min}$ pour la valeur minimale à 2.5 % et $x_{\max}$ pour la valeur maximale à 2.5% données par $G(x)$ et $F(x)$.

L'intervalle de confiance a été calculé pour chaque paramètre et durant chaque mois et le tableau 6 représente la valeur de R avec l'intervalle de confiance à 95 % pour chacun des paramètres, pour chacun des mois.

On note une différence entre les intervalles de confiance estimés selon le paramètre et selon le mois. Lorsqu'on considère les paramètres NO_3 et NH_4 , on constate que la valeur de R respective est bien comprise dans l'intervalle de confiance ceci pour les mois de septembre, de janvier et de février. Pour le paramètre PO_4 , son R est également comprise dans l'intervalle de confiance aux mois de septembre et de janvier. Concernant le paramètre COT , on note que la valeur de R calculée à partir de COD est bien incluse dans l'intervalle de confiance aux mois d'octobre, de janvier et de février.

Tableau 6 : valeur de R avec l'intervalle de confiance (contenant 95 % des valeurs)

R	Septembre 2010	Octobre 2010	Janvier 2011	Février 2011
NO_3	1.00 [0.47, 4.48]	0.18 [0.20, 2.90]	1.13 [0.49, 1.65]	0.57 [0.58, 2.05]
NH_4	1.00 [0.23, 5.47]	0.11 [0.23, 4.39]	1.40 [0.50, 2.20]	0.43 [0.18, 3.67]
PO_4	1.13 [0.41, 2.72]	0.20 [0.30, 3.32]	0.79 [0.45, 1.55]	0.29 [0.55, 2.46]
COT	5.93 [0.22, 2.72]	0.98 [0.07, 3.67]	1.42 [0.02, 3.00]	0.51 [0.05, 6.05]

IV. Discussion & conclusion

Ce travail mené dans le cadre du projet Agence de l'Eau Artois-Picardie porte sur l'étude de la rivière Wimereux, et vise à l'estimation des apports en sels nutritifs de la rivière. Cette étude a consisté en:

- ✓ le calcul du flux de nutriments à haute fréquence : flux azoté, flux de phosphate (PO₄) et flux de carbone organique total (COT).
- ✓ la comparaison de la valeur du flux estimée à haute fréquence avec celle obtenue à basse fréquence
- ✓ le calcul d'un intervalle de confiance donnant un intervalle à l'intérieur duquel se situera une mesure ponctuelle, dans 95% des cas.

La rivière Wimereux prend sa source à Colembert et traverse les terres agricoles pour se jeter en Manche à Wimereux. Les nutriments (nitrates et phosphates) ont principalement pour origines l'agriculture et les collectivités, et sont rejetés en Manche au niveau de Wimereux. De nombreux travaux ont montré que cet écosystème (Manche orientale) répond rapidement à l'excès de nutriments par des apparitions massives d'algues (Gentilhomme et Lizon, 1998 ; Lefebvre, 2008 ; Lefebvre et Delpech, 2004) et que le nitrate, le nutriment azoté principal, favorise la croissance algale et peut conduire à une eutrophisation (Gentilhomme et Lizon, 1998). Il est donc utile de connaître la quantité de nitrate (ou autres sels nutritifs) émise par les rivières en général ; ici nous prenons la rivière Wimille comme exemple méthodologique. Généralement, les sels nutritifs sont quantifiés via un flux moyen (Neal et Heathwaite, 2005). Ces sels nutritifs font partie des substances contribuant à l'évaluation de la qualité des eaux via le Système d'Evaluation de la Qualité des eaux (SEQ – eau – Agence de l'eau, 1999), et à l'évaluation de l'état des eaux au sens de la Directive Cadre Eau (DCE) qui vise le bon état des masses d'eau pour 2015 (directive 2000/06/EC). Que ce soit pour le SEQ eau ou la DCE, ce sont les percentiles 90 qui sont comparés aux seuils définissant les classes de qualité ou d'état. On notera que les seuils SEQ et DCE sont les mêmes à l'exception des nitrates pour lesquels le seuil de bon état a été fixé à 50 mg/l (pour le SEQ le seuil bon/moyen est fixé à 10 mg/l).

Au cours de nos deux périodes d'étude, la rivière Wimereux est caractérisée par des concentrations moyennes en nitrate (NO_3) de 14.98 mg/l en automne (septembre-octobre 2010) et de 15,69 mg/l en hiver (janvier-février 2011) avec un maximum de concentration de 29.13 mg/l de NO_3 mesuré en automne. L'évaluation de la qualité des eaux du Wimereux a été effectuée en 2005 par le SEQ Eau et le classant comme étant chimiquement « mauvais », notamment pour les eaux de surface.

Cependant, selon la grille de 1971 et l'évaluation par le SEQ Eau pour l'année 2005, on note un classement de « très bonne qualité » et de « qualité moyenne » respectivement des eaux du Wimereux via les nitrates (Qualité des rivières sur le bassin Artois-Picardie, donnée 2005 : <http://www.eau-artois-picardie.fr>). Durant nos périodes d'étude les percentiles 90 sont estimés à 26 mg/l de septembre à octobre 2010 et de 16.44 mg/l de janvier à février 2011. Le seuil donné par le SEQ Eau est de 10 mg/l (le seuil de la grille multi usages est de 25). On note que nos valeurs de percentiles 90 durant les deux périodes de mesures sont bien supérieurs à la valeur fixée de « bonne qualité des eaux » par le SEQ Eau.

Concernant le flux calculé en automne, il indique une teneur moyenne de 4.95 g NO_3 /s soit environ 427 kg/jour de NO_3 émise par le Wimille. Le calcul fait en hiver (période de renouvellement de nitrate) indique une teneur moyenne de 15.09 g NO_3 /s soit 1304 kg/jour pour les mois de janvier à février 2011. A titre comparatif, le flux annuel sur la période de mars 2001 à juin 2002 (sur une période assez longue) émis par le Wimille était estimé à 534 tonnes/an (Ifremer, Projet Apports CPER), soit 1488 kg/jour. Cette valeur est supérieure à nos estimations en hiver pendant une période de fort débit ; il nous semble donc que, en tant que moyenne annuelle, cette valeur est surestimée.

Les concentrations en ammonium (NH_4) sont relativement plus faibles que celles des nitrates. Le NH_4 est de 0.21 mg/l en automne contre 0.09 mg/l en hiver. Les percentiles 90 sont de 0.31 mg/l de septembre à octobre et de 0.12 mg/l de janvier à février et à titre comparatif le seuil de « qualité bonne » est fixé à 0.5 mg/l de NH_4 par le SEQ Eau et par la DCE. Le flux moyen de NH_4 estimé durant les deux campagnes à haute fréquence est compris entre 0.06 en automne et 0.08 g/s en hiver soit 5.2 kg/jour ou 1.9 tonnes/an en automne et 6.9 kg/jour ou 2.5 tonnes/an en

hiver. La plus grande partie de NH₄ émise par le Wimereux a lieu ici en hiver (de janvier à février).

Les concentrations en PO₄ varient entre 0.75 mg/l en automne (avec un maximum mesuré de 5.02 mg/l) et 0.27 mg/l en hiver. Les valeurs du percentile 90 sont de l'ordre de 0.82 mg/l de septembre à octobre 2010 et de 0.30 mg/l de janvier à février 2011 à titre comparatif, le seuil de « bonne qualité » est fixé à 0.5 mg PO₄/l par le SEQ et la DCE. On constate qu'en automne notre valeur est bien supérieure à cette valeur seuil. Le flux moyen de PO₄ calculé durant la période d'étude est de l'ordre de 0.20 g/s en automne (septembre-octobre) et de 0.11 g/s en hiver soit 17.3 kg/jour ou 6.22 tonnes/an en automne et 9.5 kg/jour ou 3.42 tonnes/an en hiver (janvier-février 2011).

Les eaux du Wimereux présentent lors de la période d'étude une concentration moyenne en carbone organique total (COT) de l'ordre de 2.82 mg/l en hiver (janvier-février 2010) et une concentration moyenne en COT de 6.41 mg/l en automne (janvier-février 2011). Les percentiles 90 sont de 11.69 mg/l en automne et de 5.75 mg/l en hiver alors que la DCE et le SEQ Eau fixe le seuil de « bonne qualité » à 7 mg de carbone organique/l. Le flux moyen de COT estimé durant les deux campagnes à haute fréquence est de 2.29 en automne et 3.41 g/s en hiver soit 198 kg/jour ou 71.23 tonnes/an en automne et 295 kg/jour ou 106.06 tonnes/an en hiver. On constate que les apports en COT sont donc moins élevés par rapport à la teneur en nitrate pour la même période d'étude.

Tableau 7 : Les rapports entre flux basse fréquence et flux moyen, montrant la précision des estimations à basse fréquence.

	NO ₃			NH ₄			PO ₄			COT		
	F _{BF}	$\bar{F}$	R	F _{BF}	$\bar{F}$	R	F _{BF}	$\bar{F}$	R	F _{BF}	$\bar{F}$	R
Sept 2010	1.99	1.98	1	0.05	0.05	1	0.17	0.15	1.13	5.93	1.00	5.93
Oct 2010	2.02	10.97	0.18	0.01	0.09	0.11	0.06	0.30	0.2	4.67	4.76	0.98
Jan 2011	21.6	19.15	1.13	0.14	0.10	1.4	0.23	0.29	0.79	6.52	4.58	1.42
Fev 2011	6.25	10.88	0.57	0.03	0.07	0.43	0.06	0.21	0.29	1.06	2.09	0.51

Comparaison entre flux basse fréquence et flux moyen : tableau synthétique.

Le tableau 7 présente de façon résumée les résultats obtenus pour le rapport R pour toutes les quantités considérées. Selon les périodes et les quantités considérées, le rapport varie entre 0.11 et 5.93, ce qui montre que le **flux basse fréquence, pour les cas considérés ici, est une approximation « à un facteur 10 près »** (au maximum 9 fois trop grand et au minimum 6 fois trop petit), ce qui indique que le flux basse fréquence est correct à un ordre de grandeur près. Si l'on se donne un seuil à 15% près, on peut dire que le flux basse fréquence est correct 5 fois sur 16, soit environ dans 30% des situations considérées, tandis qu'il est correct à « **un facteur 2 près** » (rapport R compris entre 0.5 et 2) dans 10 cas sur 16, soit **60% des cas considérés**. La Figure 20 récapitule ceci : elle représente l'évolution de la précision des flux basse fréquence (en abscisse) et le pourcentage de bonnes valeurs en ordonnées. Ceci montre par exemple que **80% des estimations de flux à basse fréquence sont correctes à un facteur 5 près**.

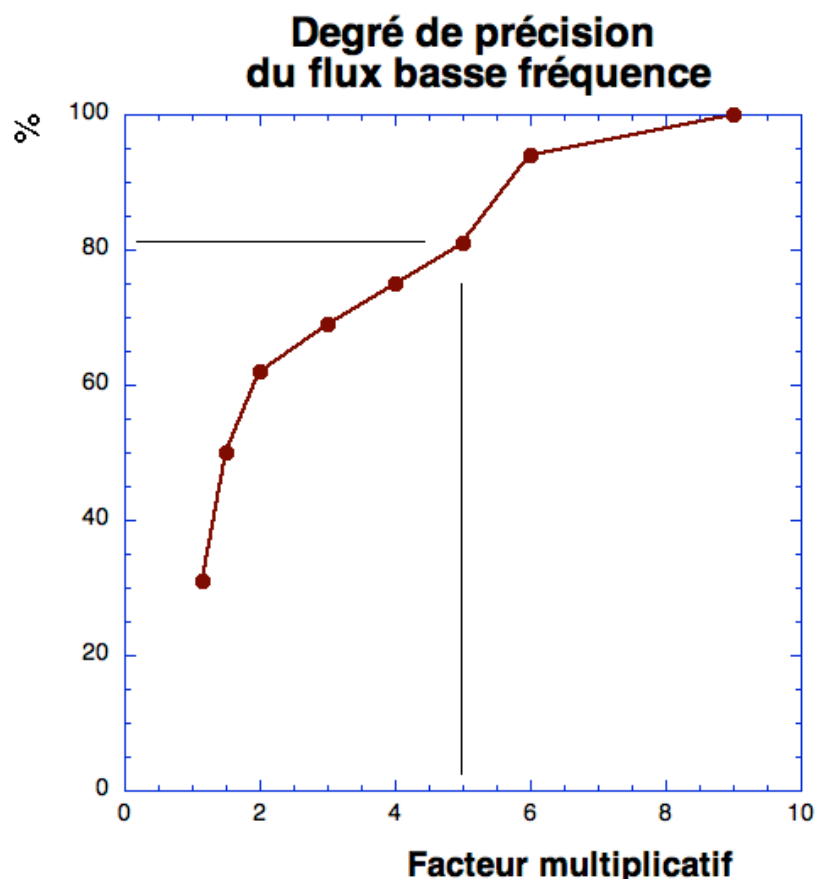


Figure 20. Horizontalement : facteur multiplicatif correspondant à l'exactitude relative des flux basse fréquence, et verticalement le pourcentage de valeurs correspondant. On voit par exemple que 80% des estimations de flux sont correctes à un facteur 5 près.

Relation avec les débits.

Durant les deux campagnes, la rivière de Wimereux possède un régime saisonnier avec une période de fort débit en hiver ici de janvier à février ($0.97 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) et de faibles débits au début de l'automne de septembre à octobre ($0.27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Les valeurs élevées de flux obtenues coïncident avec celles du débit. En comparant les flux calculés pour chaque paramètre nutritif, on constate que les plus fortes teneurs en matières azotées sont mesurées durant les périodes de forts débits. Contrairement à d'autres paramètres, le flux moyen de PO_4 calculé semble plus élevé durant l'automne donc durant le faible écoulement. L'estimation du flux de NH_4 , de NO_3 , de PO_4 et de COT sur les 4 mois d'étude (septembre, octobre, janvier et février), indique que la quantité de nitrate (NO_3) reste majoritaire car elle représente 75.8 % des matières émises par le Wimereux alors que l'ammonium représente 0.6 % et le phosphate (PO_4) 1.7 % et quant au Carbone organique total, il représente 21.9 % du flux total de matière. 71 % de la matière est émise en hiver ici de janvier à février.

Concernant la deuxième partie de notre étude qui avait pour but de définir un intervalle de confiance autour de la valeur des flux mensuels « basse fréquence », on note tout d'abord que les valeurs du flux moyen à basse fréquence ne sont pas généralement du même ordre de grandeur que celles du flux moyen à haute fréquence. Les différences sont assez faibles au cours du mois de septembre pour le nitrate, l'ammonium et le phosphate. On constate que le rapport R (flux basse fréquence divisée par le flux haute fréquence) est égal à 1 pour les nitrates en septembre ; on suppose donc ici que la mesure basse fréquence était suffisante. Ce résultat est identique pour l'ammonium au même mois. Les valeurs de R sont très irrégulières et ensuite lorsqu'on s'intéresse proprement à l'intervalle de confiance à 95 % de valeurs, on constate que les quantités de NO_3 , de NH_4 , de PO_4 et de COT montrent une certaine irrégularité pour toutes les dates. En comparant les paramètres entre eux, on note également une différence entre les intervalles de confiance, et ces intervalles de confiance sont généralement assez grands par rapport à la valeur du flux mesuré à basse fréquence. Au mois d'octobre, les valeurs de flux à basse fréquence ne sont pas incluses dans l'intervalle de confiance, cela

est probablement dû à la période de mesure. La date de mesure à basse fréquence (22 octobre 2010) est en dehors de la période de campagne à haute fréquence au même mois (1 au 11 octobre 2010).

Références

Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Official Journal of the European Communities* 22.12.2000, pp. L327/1-327/21.

Gentilhomme, V., Lizon, F., 1998. Seasonal cycle of nitrogen and phytoplankton biomass in a well mixed coastal system (Eastern English Channel). *Hydrobiologia* 361. 191-199.

Lefebvre, A., Delpech, J. P., 2004. *Le bloom de phaeocystis en Manche orientale : nuisances socio-économiques et /ou écologiques.* Rapport. Ifremer/R.INT.DEL/BL/RST/04/01, 36pp.

Lefebvre, A., 2008. *Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche Mer du Nord.* Rapport Final projet Liteau II. 04/121510/MF, 110 pp.

Neal, C., Heathwaite, A. L., 2005. Nutrient mobility within river basins: a European perspective. *Journal of Hydrology* 304, 47-490.

Annexes

Annexe 1

Mesures des concentrations à basse fréquence (donnée mensuelle) : septembre et octobre 2010

NO₃ (nitrate)

24/09/2010 : 6.6 mg/l

22/10/ 2010 : 12.7 mg/l

NH₄ (ammonium)

24 /09/ 2010 : 0.17 mg/l

22/10/2010 : 0.08 mg/l

PO₄ (phosphate)

24/09/2010 : 0.55 mg/l

22/10/2010 : 0.39 mg/l

COD (carbone organique dissous)

24/09/2010 : 5.93 mg/l

22/10/2010 : 4.67 mg/l

Débit en septembre 2010 : $0.301 \text{ m}^3 / \text{s}$

Débit en octobre 2010 : $0.159 \text{ m}^3 / \text{s}$

Mesures des concentrations à basse fréquence (donnée mensuelle) : janvier et février 2011

NO3 (nitrate)

25/01/2011: 14.3 mg/l

09/02/2011: 15.1 mg/l

NH4 (ammonium)

25 /01/ 2011: 0.14 mg/l

09/02/2011 : 0.033 mg/l

PO4 (phosphate)

25/01/2011: 0.55 mg/l

09/02/2011: 0.062 mg/l

COD (carbone organique dissous)

25/01/2011 : 6.52 mg/l

09/02/2011 : 1.06 mg/l

Débit le 25 janvier 2011 : $1.51 \text{ m}^3 / \text{s}$

Débit le 9 février 2011 : $0.414 \text{ m}^3 / \text{s}$

Annexe 2

Calcul de l'Intervalle de confiance: distribution asymétrique

L'incertitude est donnée par ρ . Calcul du flux normalisé : $\rho = \frac{X(t)Q(t)}{\bar{X}Q}$

NO3 : octobre 2010

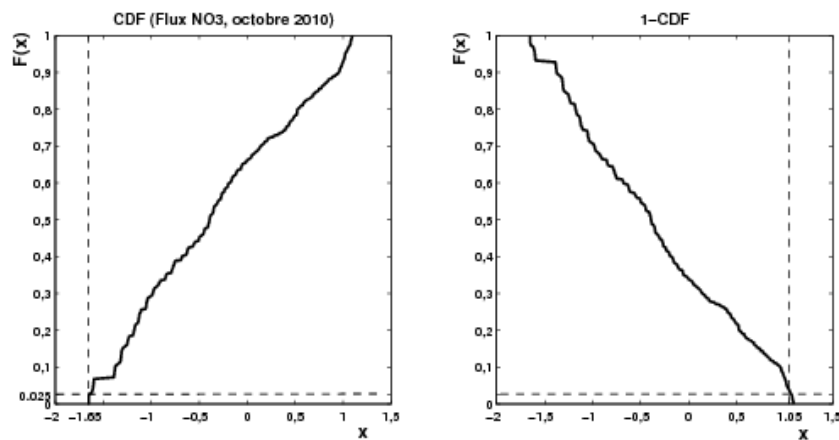


Figure 1: fonction cumulative de $\log \rho$ (flux normalisé): $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -1.65$
 $x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.05$

Incertainitude : $\log \rho$ compris entre $[-1.65 ; 1.05]$; $\rho \in [0.2 ; 2.9]$

NO3 : septembre 2010

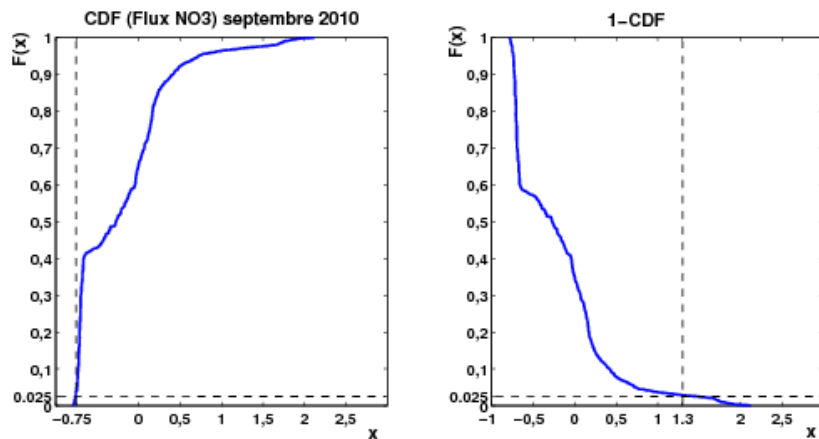


Figure 2: fonction cumulative de $\log \rho$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -0.75$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.5$$

Incertitude : log ρ compris entre [-0.75, 1.30] ; $\rho \in [0.47, 4.48]$

De septembre à octobre 2010 $\rho \in [0.2, 6.05]$.

NO3 : janvier 2011

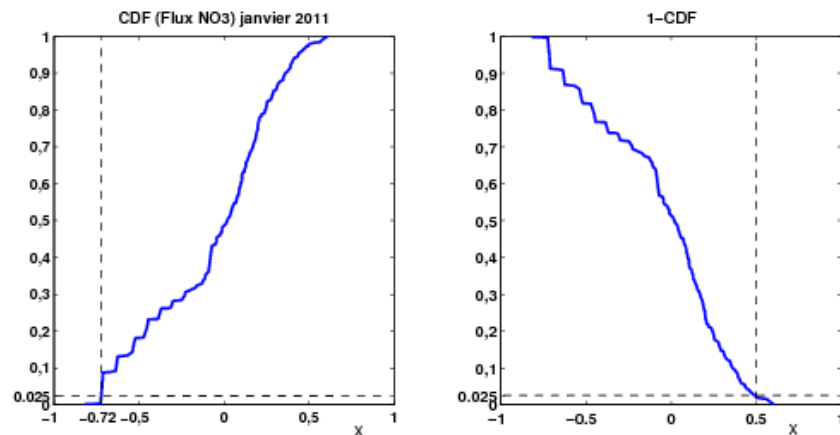


Figure 3: fonction cumulative de log ρ : $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -0.72$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 0.5$$

Incertitude : log ρ compris entre [-0.72, 0.5] ; $\rho \in [0.49, 1.65]$

NO3 : février 2011

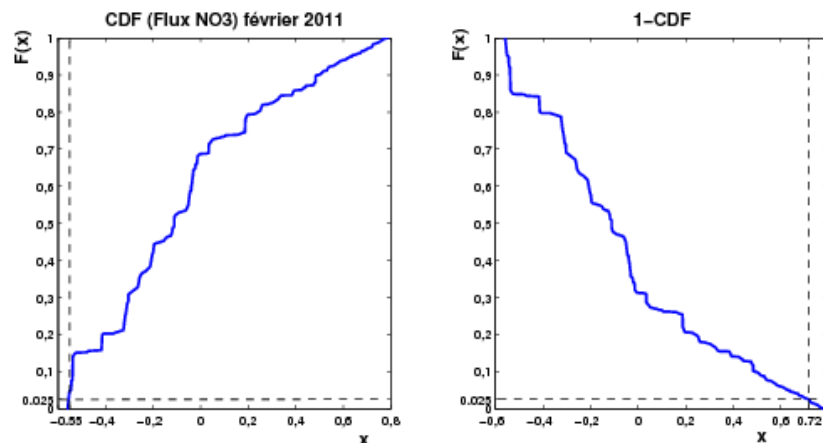


Figure 4: fonction cumulative de log ρ : $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -0.55$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 0.72$$

Incertitude : log ρ compris entre [-0.55, 0.72] ; $\rho \in [0.58, 2.05]$

De janvier à février 2011 $\rho \in [0.42, 1.97]$.

NH4 : octobre 2010

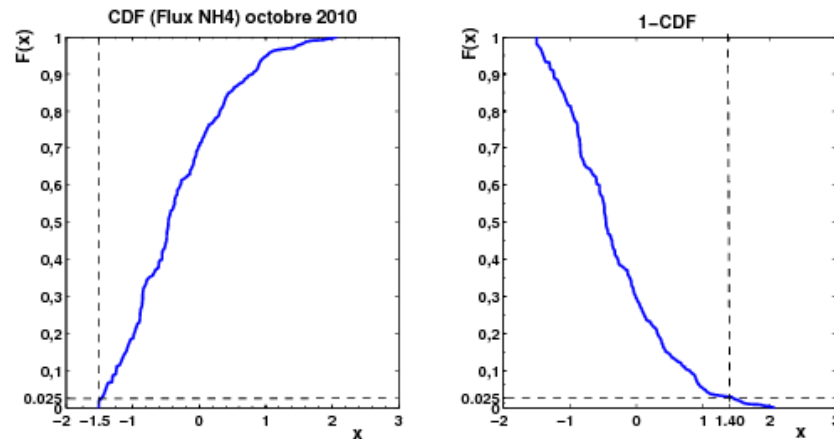


Figure 5: cumulatif de $\log \rho$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -1.50$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.40$$

Incertitude est compris entre $[-1.5 : 1.4]$; $\rho \in [0.23, 4.39]$

NH4 : septembre 2010

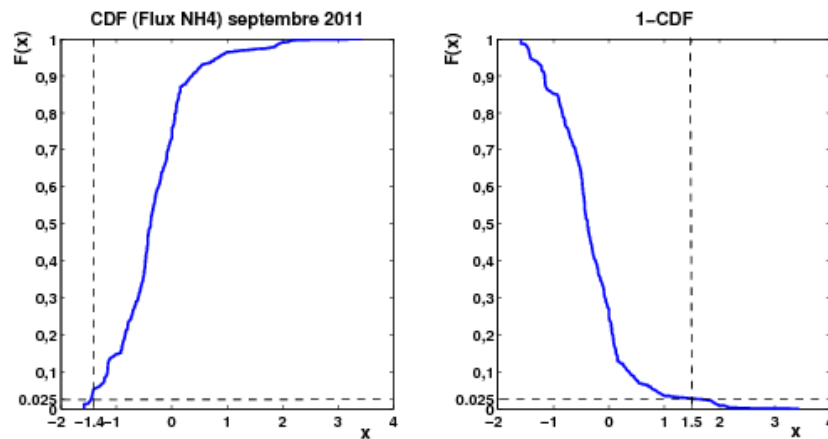


Figure 6: cumulatif de $\log \rho$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -1.46$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.70$$

Incertitude est compris entre $[-1.46 : 1.7]$; $\rho \in [0.23, 5.47]$

De septembre à octobre 2010 $\rho \in [0.5, 2.05]$

NH4 : janvier 2011

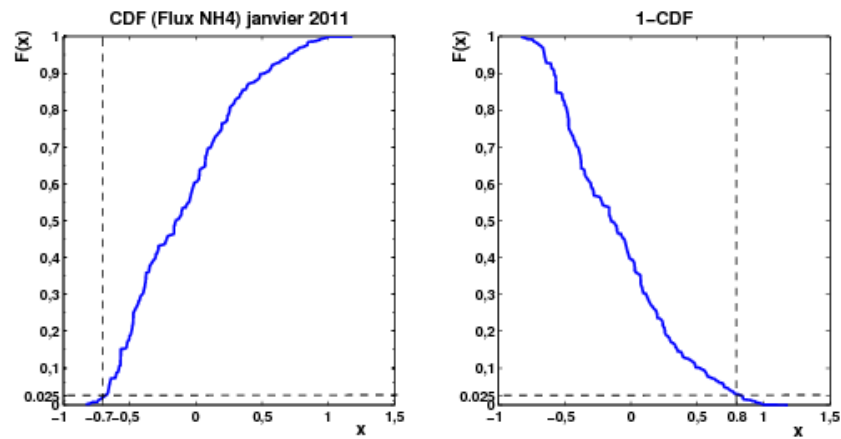


Figure 7: cumulatif de $\log p$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -0.7$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 0.8$$

Incertitude est compris entre $[-0.7 : 0.8]$; $p \in [0.50, 2.20]$

NH4 : février 2011

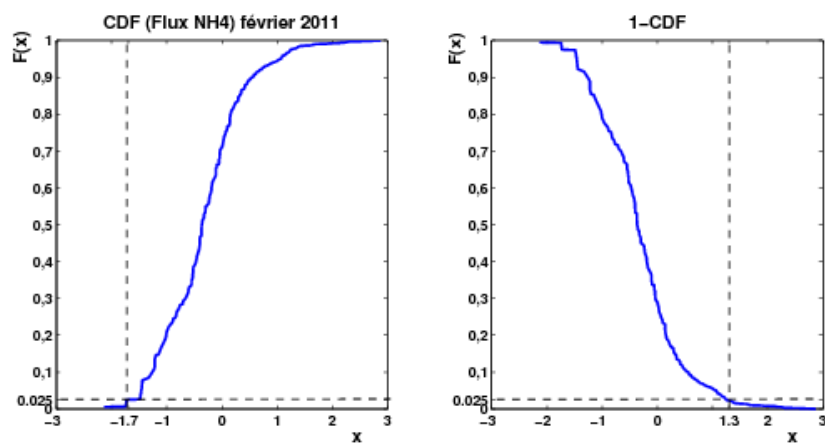


Figure 8: cumulatif de $\log p$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -1.70$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.3$$

Incertitude est compris entre $[-1.7 : 1.3]$; $p \in [0.18, 3.67]$

De janvier à février 2011 $p \in [0.18, 2.72]$.

PO4 : octobre 2010

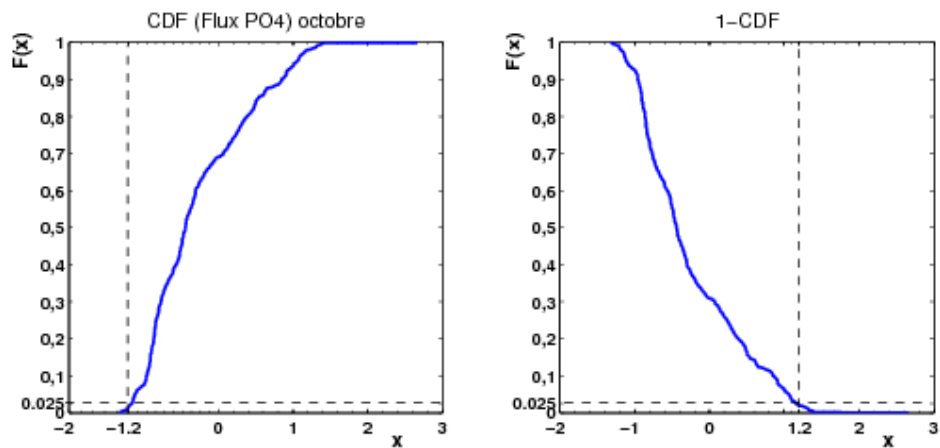


Figure 9: cumulatif de log ρ : $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -1.20$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.20$$

Incertitude est compris entre $[-1.20 : 1.20]$; $\rho \in [0.30, 3.32]$

PO4 : septembre 2010

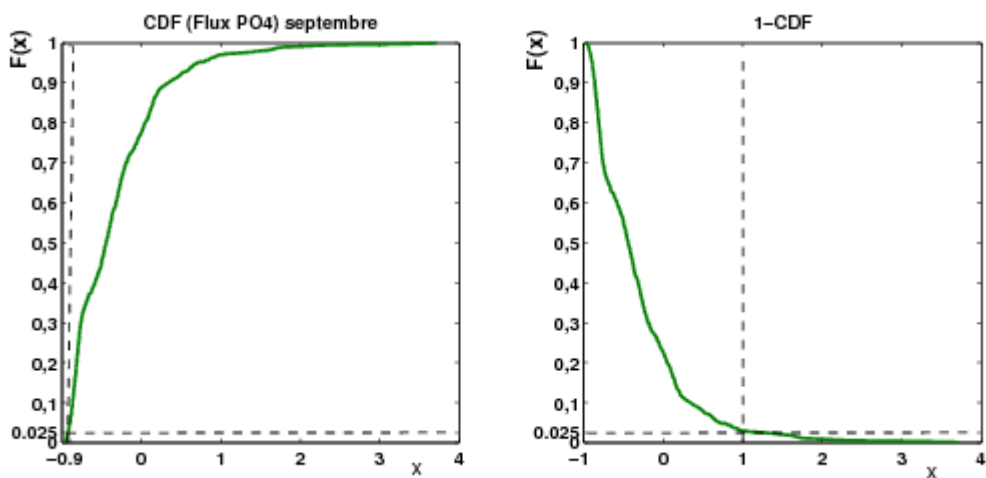


Figure 10: cumulatif de log ρ : $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -0.9$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1$$

Incertitude est compris entre $[-0.9 : 1]$; $\rho \in [0.41, 2.72]$

De septembre à octobre 2010 $\rho \in [0.24, 4.31]$.

PO4 : janvier 2011

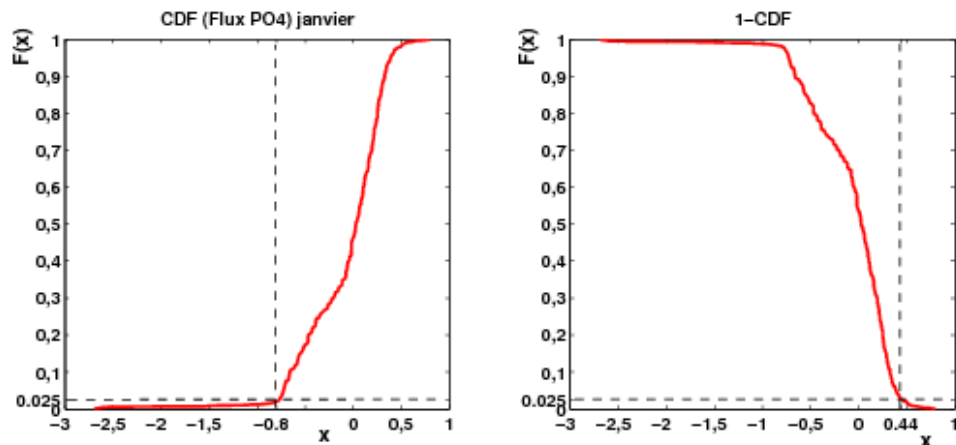


Figure 11: cumulatif de $\log p$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -0.8$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 0.44$$

Incertitude est compris entre $[-0.8 : 0.44]$; $p \in [0.45, 1.55]$

PO4 : février 2011

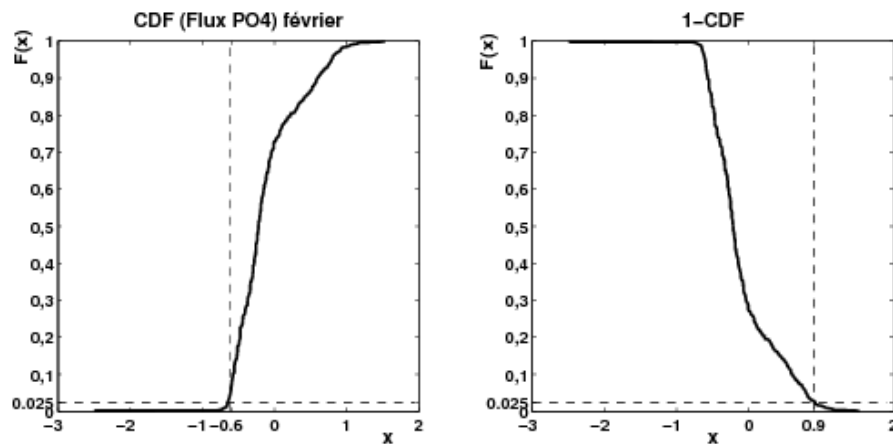


Figure 12: cumulatif de $\log p$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -0.6$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 0.9$$

Incertitude est compris entre $[-0.6 : 0.9]$; $p \in [0.55, 2.46]$

De janvier à février 2011 $p \in [0.45, 2.01]$.

COT : septembre 2010

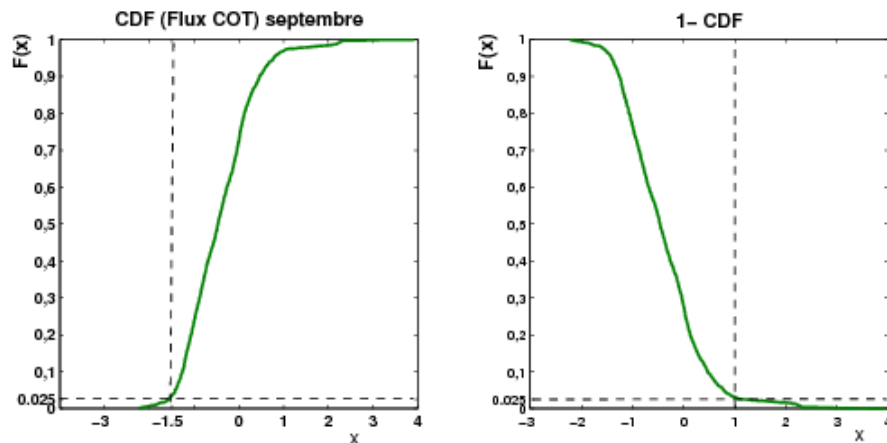


Figure 13: cumulatif de $\log p$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -1.5$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1$$

Incertitude est compris entre $[-1.5 : 1]$; $p \in [0.22, 2.72]$

COT : octobre 2010

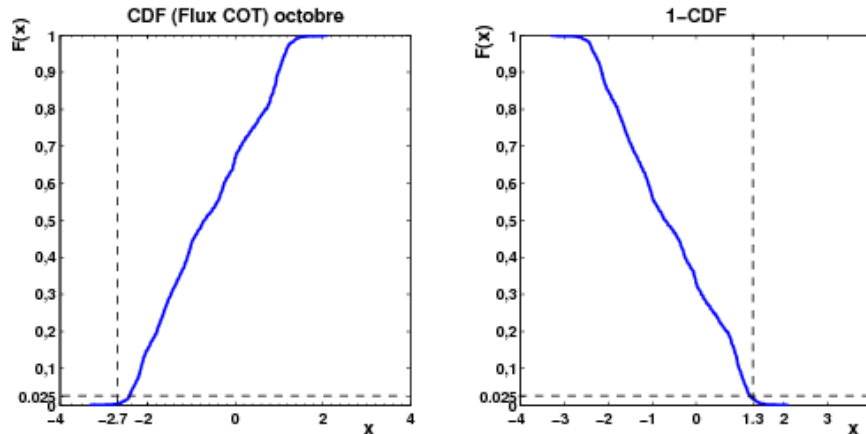


Figure 14: cumulatif de $\log p$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -2.7$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.3$$

Incertitude est compris entre $[-1.5 : 1]$; $p \in [0.07, 3.67]$

De septembre à octobre 2010 $p \in [0.1, 6.05]$.

COT : janvier 2011

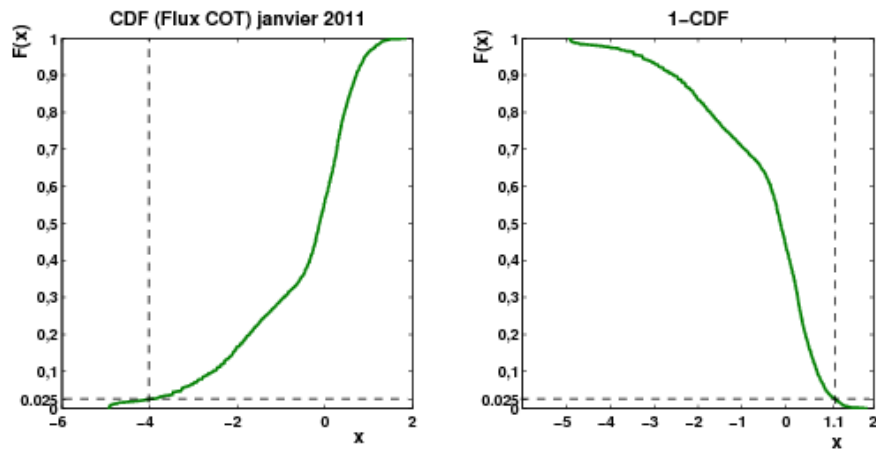


Figure 15: cumulatif de $\log p$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -4$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.1$$

Incertitude est compris entre $[-4 : 1.1]$; $p \in [0.02, 3.00]$

COT : février 2011

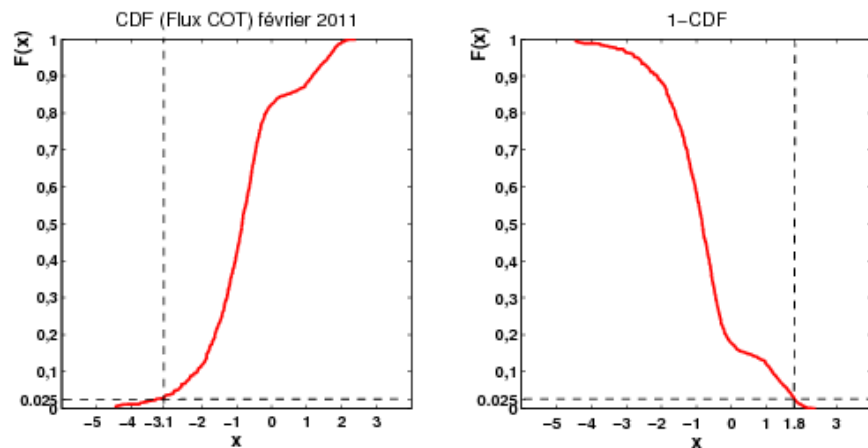


Figure 16: cumulatif de $\log p$: $x_{\min} = G(x) = 0.025 = -3.1$

$$x_{\max} = F(x) = 1 - G(x) = 0.025 = 1.8$$

Incertitude est compris entre $[-3.1 : 1.8]$; $p \in [0.05, 6.05]$

De janvier à février 2011 $p \in [0.03, 3.86]$