

E

Indicateurs pour la représentation des données de suivi et leur méthode de calcul

- Fiche E-1 Calcul des flux annuels de nitrate par année civile / par année hydrologique
- Fiche E-2 Indices d'écoulement de base (base flow index)
- Fiche E-3 Modes de calcul des concentrations moyennes annuelles de nitrates
- Fiche E-4 Modes de calcul des flux moyens annuels
- Fiche E-5 Hydraulicité, correction de l'effet de la pluviosité: flux pondéré par l'hydraulicité
- Fiche E-6 Méthode pour définir des objectifs de qualité en concentration, en flux et en bilan dans les bassins versants
- Fiche E-7 Bassin versant, sous-bassin versant, tronçon et calcul de flux
- Fiche E-8 Méthode d'interpolation de données manquantes dans une série de données chronologiques
- Fiche E-9 Méthode d'extrapolation spatiale des données de débit
- Fiche E-10 Moyennes mobiles

Voir également les autres fiches disponibles sur les thèmes suivants :

A

Processus hydrologiques dans les bassins versants

B

Rôle, formes et transferts d'éléments intervenant dans la qualité des eaux

C

Temps de réponse des bassins versants

D

Les mécanismes de perturbation littorale liés aux apports terrestres de nutriments

F

Clés de lecture ou d'interprétation des chroniques de suivi de la qualité des eaux

G

Protocoles de suivi de la qualité de l'eau dans les bassins versants

H

Impacts de la gestion de l'interculture sur la qualité de l'eau

I

Le phosphore dans le sol

J

Rôle des éléments du paysage dans le bassin versant

CALCULS DES FLUX ANNUELS DE NITRATE PAR ANNEE CIVILE / PAR ANNEE HYDROLOGIQUE

DEFINITION

L'analyse de l'évolution inter-annuelle des flux de nitrates peut se faire à partir du calcul des flux annuels par **année civile** (du 1^{er} janvier au 31 décembre) ou à partir du calcul par **année hydrologique** (du 1^{er} octobre au 30 septembre).

L'**année hydrologique** correspond à une période continue de 12 mois pendant laquelle se produit un cycle climatique complet. Elle est choisie de sorte que la variation de l'ensemble du stock d'eau du bassin versant soit minimale pour minimiser les reports d'une année sur l'autre. Le début de l'année hydrologique correspond au début de la reconstitution des stocks d'eau des bassins, c'est-à-dire à la reprise des précipitations au début de l'automne dans la région Bretagne. Le début de l'année hydrologique est couramment fixé au 1^{er} octobre dans cette région : le choix de cette date précisément est quelque peu arbitraire, il est justifié par le fait que les premières précipitations automnales significatives ont généralement lieu à partir du début octobre.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Le **calcul par année civile lisse les variations** inter-annuelles des flux de nitrate. La valeur de la moyenne inter-annuelle des flux de nitrates est peu affectée par le mode de calcul.
- L'année hydrologique est l'unité temporelle la plus pertinente pour analyser des fonctionnements hydrologiques et hydrochimiques des bassins versants.

COMPARAISON DES DEUX MODES DE CALCULS DES FLUX ANNUELS SUR UN EXEMPLE

La moyenne inter-annuelle des flux de nitrate est peu affectée par le mode de calcul des flux annuels (Figure 1). Dans l'exemple présenté ci-contre, elle est de $40,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le calcul par année civile et de $39,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le calcul par année hydrologique.

La variabilité inter-annuelle des flux de nitrate est plus faible dans le cas du calcul par année civile que dans le cas du calcul par année hydrologique : dans l'exemple ci-contre, l'écart-type des flux annuels de nitrate sur 23 ans est de $13,6 \text{ kg}^2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{an}^{-2}$ pour le calcul par année civile et de $17,2 \text{ kg}^2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{an}^{-2}$ pour le calcul par année hydrologique.

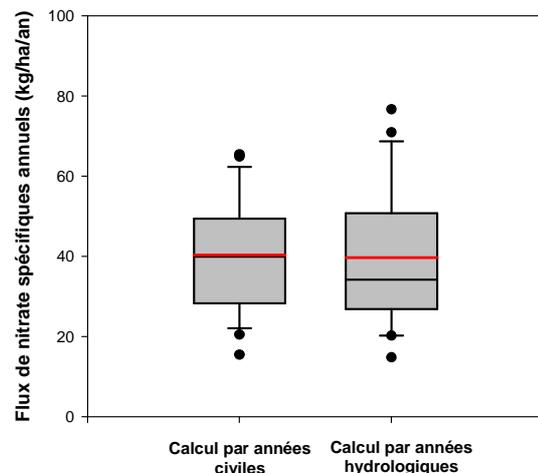


Figure 1 : Distribution des valeurs des flux annuels de nitrates, calculés par année civile et par année hydrologique, dans un bassin versant breton sur une période de 23 ans. (La moyenne est figurée par le trait rouge)

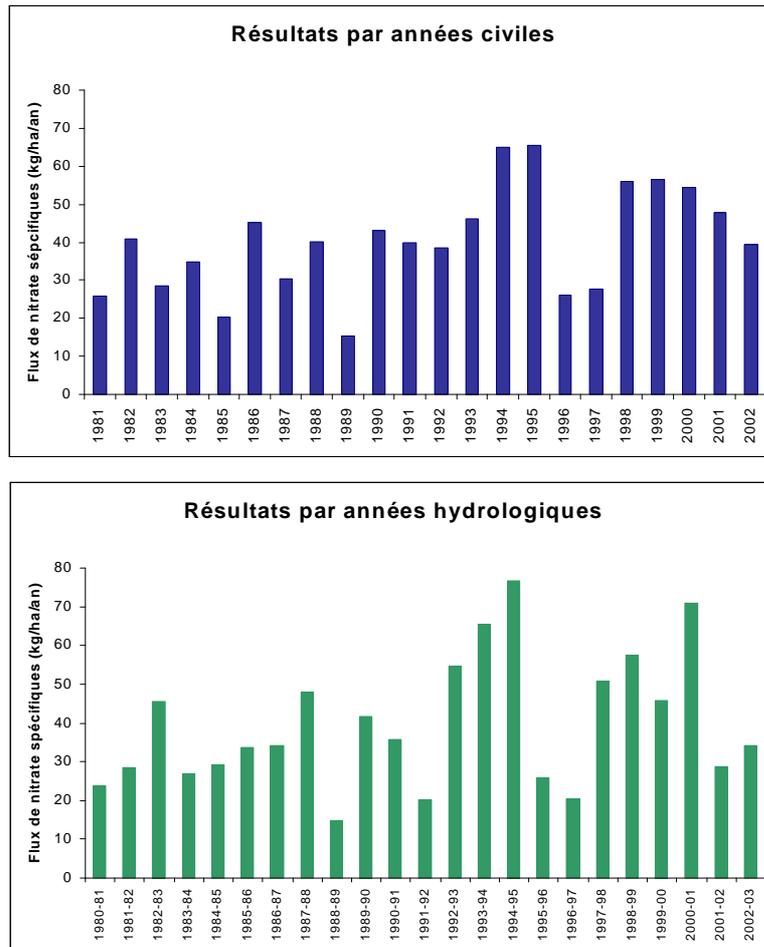


Figure 2 : Flux annuels de nitrates sur une période de 23 ans dans un bassin versant breton. Calculs par année civile et par année hydrologique.

Dans le calcul par année civile, les périodes hivernales, où tombent la majorité des précipitations annuelles, sont réparties sur 2 ans. De ce fait, dans ce calcul les « anomalies » liées soit aux années sèches, soit aux années humides, sont lissées. Par exemple, la figure 2 montre que, dans le cas d'un hiver sec tel que l'hiver 1991-92, les flux annuels de nitrate calculés par année hydrologique sont faibles alors que dans le calcul par année civile, cette baisse des flux n'apparaît pas : le déficit de pluviométrie est masqué, en raison de la répartition de la période hivernale sur deux années civiles. De même, le graphique de la figure 2 montre que le climat contrasté des années 1998 à 2003 entraîne une variabilité des flux de nitrate dans le cas du calcul par année hydrologique alors que la variabilité inter-annuelle des flux est moins marquée dans le calcul par année civile.

Le calcul par années hydrologiques rend donc mieux compte du fonctionnement hydrologique et hydrochimique des bassins versants.

INDICES D'ÉCOULEMENT DE BASE

● **DEFINITION**

 **L'écoulement de base** désigne la composante de l'écoulement provenant de la vidange des réserves du bassin, souterraines ou superficielles, c'est-à-dire essentiellement du tarissement des nappes. Il représente :

- l'ensemble de l'écoulement qui se produit dans un cours d'eau pendant les périodes sans précipitation, donc en été en régions tempérées.
- Une partie de l'écoulement pendant le reste de l'année.

● **PROBLEMATIQUE : POURQUOI S'INTERESSER A L'ÉCOULEMENT DE BASE ?**

En période de hautes eaux, pendant l'hiver, il existe une contribution des eaux provenant de la partie supérieure de la nappe et une contribution des eaux souterraines plus profondes, qui ont des teneurs différentes en nitrate. En période de basses eaux, pendant l'été, il existe une contribution majoritaire des eaux d'origine plus profonde, qui ont un temps de transfert plus lent.

La contribution des écoulements de nappe lents est l'un des facteurs de variation du niveau et de la dynamique des concentrations en nitrate dans les cours d'eau entre les bassins versants.

Plusieurs indices sont utilisés pour quantifier la contribution de l'écoulement de base à l'écoulement total des cours d'eau à partir des mesures de débit.

● **BASE FLOW INDEX DE LVOVICH (1972) ET ASSIMILES :**

● **Définition de l'indice**

Auteurs :

Le base flow index (BFI) a été défini par Lvovich (1972) et par l'Institut d'Hydrologie (1980).

Données :

Chronique des débits journaliers (Q_j)

Mode de calcul (Figure 1) :

- Calcul du volume d'eau écoulé annuel : $\sum_j Q_j$
- Les chroniques de débits sont divisées en périodes de cinq jours : les valeurs minimales de débit de chaque quintuplet sont retenues (Q_k).
- Dans un 2^{ème} temps, parmi les valeurs retenues, seules les valeurs Q_k telles que $Q_k < 0.9 Q_{k-1}$ et $Q_k < 0.9 Q_{k+1}$ sont retenues.

- La ligne qui joint les valeurs retenues englobe un volume Q_{base} correspondant aux écoulements de base.
- Le base-flow index pour une année hydrologique est donné par :
$$BFI = \frac{Q_{base}}{\sum_j Q_j}$$
- Si l'on dispose de chroniques de débit sur plusieurs années hydrologiques, le base-flow index du bassin est égal à la moyenne des valeurs annuelles du BFI.

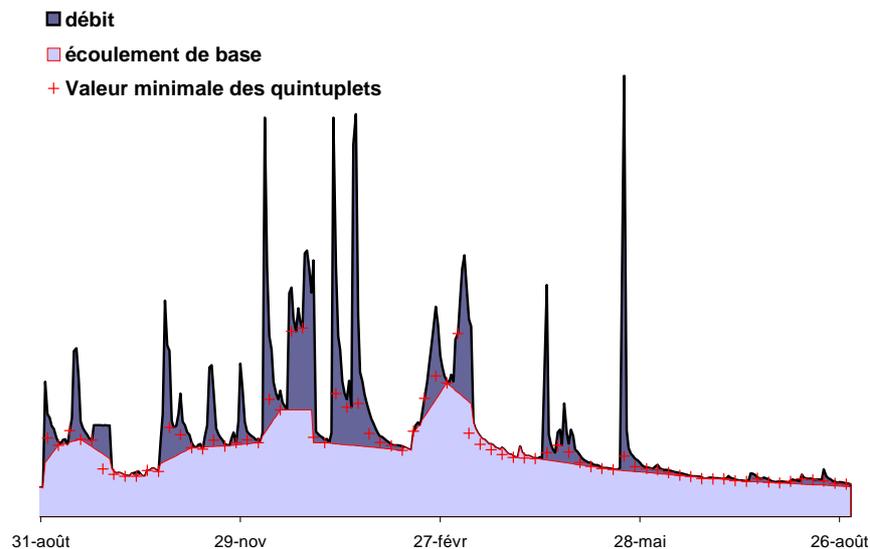


Figure 1 : Représentation schématique de l'évolution de l'écoulement total et de l'écoulement de base calculé par la méthode du Base Flow Index (Lvovich, 1972) dans un bassin versant au cours d'une année hydrologique.

Unité :

Sans dimension.

Références d'utilisation :

Le BFI a été utilisé par le CEMAGREF pour caractériser les écoulements de base dans les bassins versants bretons suivis par la DIREN (1991).

● **Avis d'experts**

J. Molénat (Hydrologue, Chargé de Recherche, INRA UMR SAS Rennes)

Le *Base Flow Index* a été développé à partir d'une conception relativement ancienne des écoulements en crue, selon laquelle l'essentiel du débit de crue provient du ruissellement de surface. L'objectif du calcul était donc d'éliminer des chroniques de débits les pics de crue correspondant à de l'eau qui ne s'est pas infiltrée, mais qui a ruisselé à la surface du sol. Or un ensemble de travaux a montré que les débits de crue sont alimentés par un mélange d'eau de ruissellement et d'écoulements de nappe (Figure 2) : dans les bassins bretons, l'écoulement de nappe peut représenter 80 à 90% du débit de crue (Mérot et al., 1981).

Le *Base Flow Index* caractérise la part relative des écoulements qui se sont infiltrés dans le bassin versant, complémentaire du ruissellement. **Il ne permet pas de caractériser la part relative des écoulements de nappe lents par rapport aux écoulements de nappe totaux.**

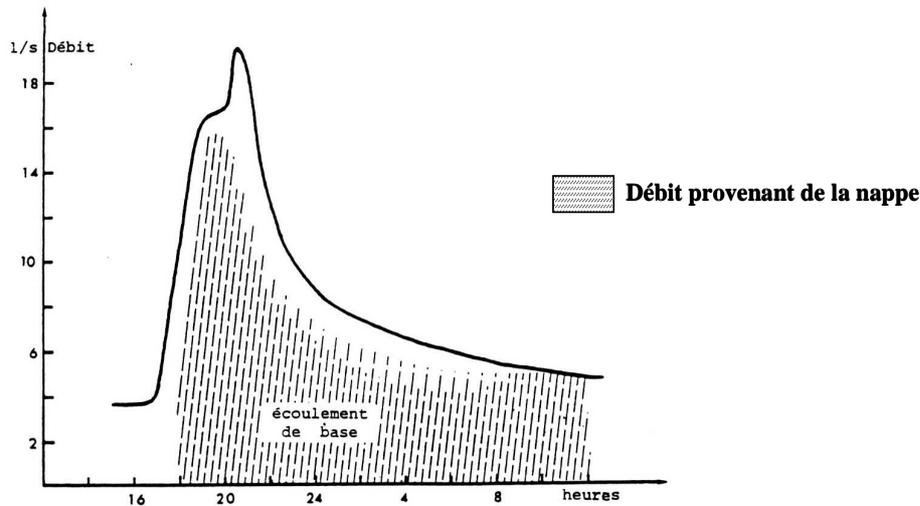


Figure 2 : Décomposition d'un hydrogramme de crue par traçage à ^{18}O dans le bassin versant de Nouvoitou (Ille-et-Vilaine). D'après Mérot et al. (1981).

P. Mérot (Hydrologue, Directeur de Recherche, INRA UMR SAS Rennes) :

- Le *Base Flow Index* est sensible au mode de séparation des débits : la séparation en périodes de 5 jours repose sur l'hypothèse que la durée des crues est inférieure ou égale à 5 jours. Or il existe une grande variabilité dans les comportements hydrologiques des bassins versants à l'échelle des crues et cette séparation n'a pas la même signification pour tous les bassins.
- L'index rend compte de la contribution des écoulements de base au débit du cours d'eau en terme de volume global mais pas de la variabilité intra-annuelle de cette contribution, qui est la caractéristique principale qui différencie les nappes dans les bassins versants bretons. La figure 3 montre en effet que deux bassins versants A et B peuvent avoir le même *Base Flow Index* alors que les répartitions dans l'année de la contribution de l'écoulement de base au débit total diffèrent.

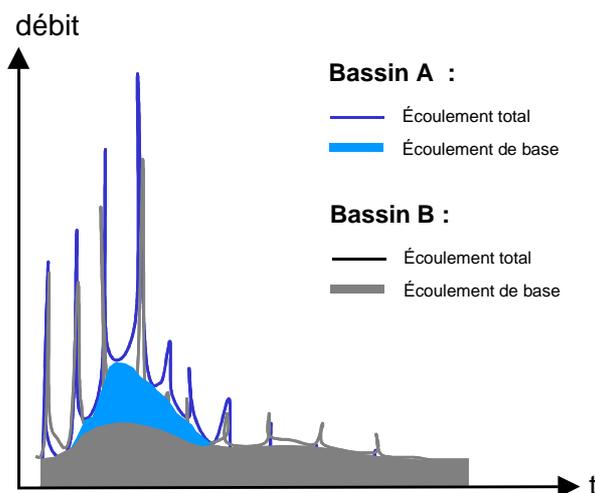


Figure 3 : Représentation schématique du débit total et de l'écoulement de base de deux bassins versants présentant le même *Base Flow Index* mais une répartition des écoulements dans l'année différente.

● Conclusions sur l'indice

Le *Base Flow Index* n'est pas adapté pour la caractérisation des écoulements de base à l'échelle annuelle (année hydrologique) ou pluri-annuelle :

- il ne caractérise pas la contribution des écoulements de nappe lents au débit mais l'ensemble des écoulements qui se sont infiltrés dans le bassin versant ;
- il caractérise un volume global d'écoulement de nappe, alors que c'est la dynamique des écoulements de nappe plus que leur volume qui influence les transferts de nitrate dans les bassins versants.

● DEBIT SPECIFIQUE D'ETIAGE: QCN30

● Définition de l'indice

Données :

Chronique des débits journaliers (Q_j)

Mode de calcul :

- Le débit spécifique d'étiage $QCN30$ représente le débit minimal non dépassé pendant 30 jours consécutifs en période d'étiage pour une année hydrologique donnée (Figure 4).
- La contribution des eaux de nappe lentes est donnée par le rapport entre le débit spécifique d'étiage et le débit spécifique moyen annuel : $\frac{QCN30}{\sum_j Q_j}$

Unité :

Le $QCN30$ est exprimé en $l.s^{-1}.km^2$.

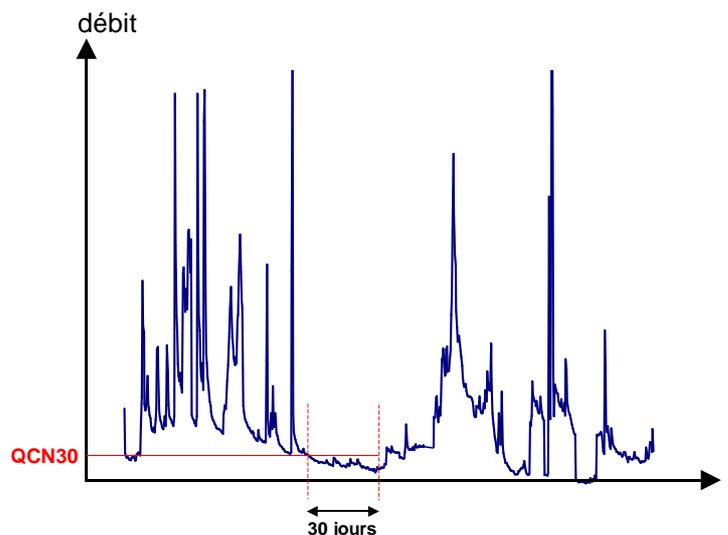


Figure 4 : Représentation du débit spécifique d'étiage sur une chronique de débits.

● Avis d'experts

Watremez et Talbo (1999)

Les valeurs de QCN30 ont été comparées aux valeurs de contribution de la nappe lente calculées à partir du modèle GARDENIA (développé par BRGM) pour plusieurs bassins versants bretons. Ce travail montre que :

- le QCN30 sous-estime les écoulements de nappe lents, et ce d'autant plus que la période de pluie efficace, où les pluies sont supérieures à l'évapotranspiration, est longue.
- une même valeur de QCN30 peut correspondre à des conditions de vidange de la nappe très différentes : elles sont gouvernées par la conductivité hydraulique et par la taille des réservoirs.
 - un étiage soutenu une année sèche témoigne d'écoulements de nappe lents importants,
 - un étiage peu soutenu peut être dû à des écoulements de nappe lents faibles ou à une perméabilité forte de l'aquifère.

P. Mérot (Hydrologue, Directeur de Recherche, INRA UMR SAS Rennes) :

- Le QCN30 caractérise bien des écoulements lents, à une période de l'année hydrologique où la pluviométrie n'alimente pas les écoulements.
- Il doit être calculé sur plusieurs années pour éliminer l'effet de la pluviosité. D'autres indices, tels que le rapport entre les débits moyens estivaux et les débits moyens hivernaux sur plusieurs années hydrologiques peuvent de même être envisagés.

J. Molénat (Hydrologue, Chargé de Recherche, INRA UMR SAS Rennes) :

- Le QCN30 caractérise bien des écoulements lents.
- Peu de références bibliographiques permettent toutefois de valider cet indicateur.

● Conclusions sur l'indice

Le débit spécifique d'étiage QCN30 peut être utilisé pour caractériser la contribution des écoulements de nappe lents au débit total d'un cours d'eau. Il permet de comparer le débit moyen, où les écoulements de nappe lents et les écoulements rapides sont mélangés, au débit en période d'étiage, où la pluviométrie n'alimente plus les écoulements.

Le QCN30 ne représente cependant qu'une approximation de la contribution des écoulements de nappe lents.

● REFERENCES

Mérot P. ; Bourguet M. ; Le Leuch M., 1981. Analyse d'une crue à l'aide du traçage naturel par l'oxygène 18, mesuré dans les pluies, le sol, le ruisseau. *CATENA* 8, 6981.

Lvovich M.I., 1972. Hydrologic budget of continents and estimate of the balance of global fresh water resources. *Sov. Hydrol.* 4.

Watremez P. ; Talbo, H., 1999. Typologie des bassins versants bretons. *In* Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral. Ploufragan, France: IFREMER, 1999. 210-219.

MODES DE CALCUL DES CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES

REMARQUE

Cette fiche est réalisée à partir de l'exemple des nitrates mais ce mode de calcul des concentrations moyennes annuelles peut être appliqué à d'autres éléments de suivi de la qualité de l'eau.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- La concentration annuelle en nitrate peut être représentée soit par la **moyenne arithmétique des concentrations journalières**, soit par la **concentration pondérée par les débits** (flux annuel de nitrate divisé par la somme annuelle des débits).
- La moyenne arithmétique donne autant de poids aux concentrations mesurées lors des périodes de faibles débits qu'aux concentrations mesurées lors des périodes de forts débits.
- La concentration pondérée par les débits constitue un indicateur intéressant, intermédiaire entre la concentration moyenne arithmétique et le flux. Elle permet de prendre en compte l'écoulement lors de la période considérée.

2 MODES DE CALCUL DES CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES DE NITRATE

Moyenne arithmétique des concentrations journalières

Données :

Chroniques des concentrations journalières (C_j) en nitrate pendant une année hydrologique.

Mode de calcul :

Les calculs sont réalisés par **année hydrologique**.

La concentration moyenne annuelle en nitrate est donnée par :

$$C_{\text{moyenne}} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} C_j}{n} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} C_j \text{ concentration du jour } j \\ n \text{ nombre de jours} \end{array}$$

Moyenne pondérée par les débits : rapport entre le flux de nitrate annuel et la somme annuelle des débits**Données :**

Chroniques des concentrations en nitrate journalières (C_j).

Chroniques des débits journaliers (Q_j)

Mode de calcul :

- Calcul du flux de nitrate annuel par année hydrologique :
 - si des données journalières de concentration en nitrate sont disponibles, le flux de nitrate (Φ) pour l'année a est donné par

$$\Phi = \sum_{j=1}^{j=365} C_j \cdot Q_j \quad \text{avec } C_j \text{ concentration journalière}$$

Q_j débit journalier

- si les données de concentration ne sont pas journalières, il faut interpoler les données disponibles pour obtenir des valeurs journalières puis calculer dans un deuxième temps le flux annuel.
- Calcul de la concentration moyenne pondérée par les débits :

$$C_{\text{pondérée}} = \frac{\Phi}{\sum_{j=1}^{j=365} Q_j}$$

Pour un bassin versant donné, en multipliant cette concentration moyenne pondérée par la lame d'eau moyenne inter-annuelle qui est une constante, on obtient un flux qui est le flux pondéré par l'hydraulicité. C'est en ce sens que l'on peut dire que cette concentration pondérée par les débits se rapproche de l'expression d'un flux. Si l'on représente sur le même graphique (Figure 1), la concentration pondérée par les débits et le flux pondéré par l'hydraulicité, on obtient deux courbes qui évoluent dans le même sens et ne se distinguent que par une constante multiplicative. Pour un bassin versant donné, il suffit donc de ne représenter que l'une de ces deux courbes qui apportent rigoureusement le même type d'information en terme d'évolution.

ILLUSTRATION

Comparaison sur un exemple des 2 modes de calculs des concentrations moyennes annuelles

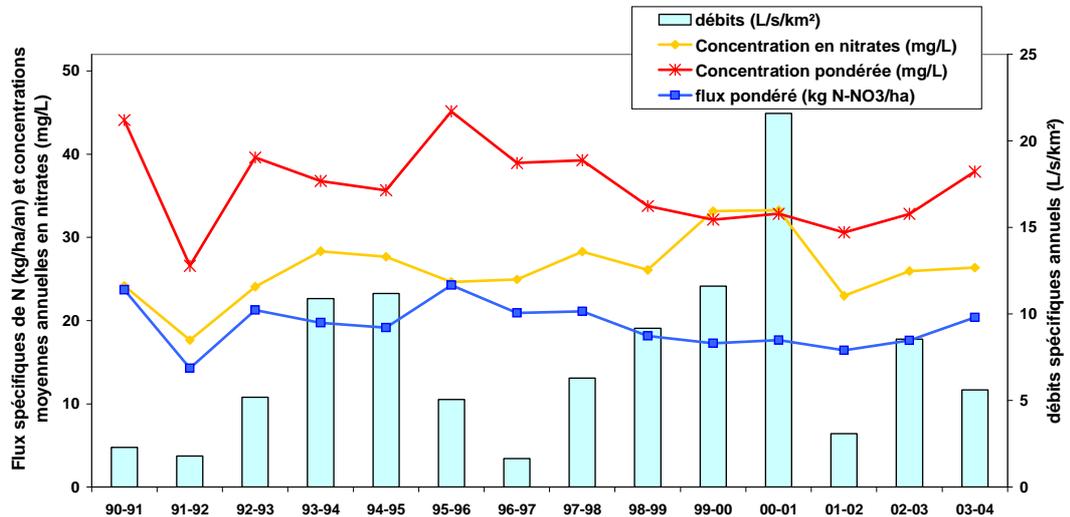


Figure 1 : Evolution de la concentration moyenne en nitrate pondérée par les débits, de la moyenne arithmétique des concentrations journalières en nitrate et des flux spécifiques pondérés par l'hydraulicité dans un bassin versant breton sur une période de 14 ans.

Dans le cas illustré, la courbe de concentration pondérée par les débits (rouge) est toujours supérieure à la courbe « moyenne arithmétique » (jaune), hormis pour les 2 années 1999/2000 et 2000/2001.

Le calcul de la moyenne arithmétique donne autant d'importance aux périodes de faibles concentrations (mois de printemps et d'été à très faible débit pour ce bassin versant) qu'aux périodes à fortes concentrations. Les mois de basses concentrations font donc baisser sa valeur. Par contre, ces périodes « basses » ont un moindre poids dans le calcul de la moyenne pondérée par les débits.

Les 2 années 1999/2000 et 2000/2001 ont connu des mois de printemps et d'été plus arrosés que les autres années. Les concentrations habituellement plus faibles voire nulles (étiage très sévère) étaient plus élevées lors de ces 2 printemps-été et ont donc tiré vers le haut la moyenne arithmétique.

L'intérêt principal de la moyenne pondérée par les débits par rapport à la moyenne arithmétique est de donner leur poids réel aux concentrations mesurées.

En conclusion, la moyenne arithmétique, indépendante des débits, convient dans une optique d'alimentation en eau potable, notamment pour réaliser des comparaisons par rapport à une norme. La concentration moyenne pondérée (ou le flux pondéré par l'hydraulicité) donne une vision plus globale du fonctionnement du bassin versant et permet des comparaisons avec l'évolution de la pression polluante.

● Autre représentation graphique de la concentration moyenne pondérée par les débits

Représentation du flux annuel de nitrate en fonction de la somme annuelle des débits (Figure 2) :

Dans ce type de représentation, la concentration moyenne annuelle pondérée par les débits pour une année donnée correspond à la tangente de la pente de la droite joignant le point de l'année considérée à l'origine. Cette représentation est moins lisible que la représentation précédente (courbe rouge de la figure 1) : dans la figure 2, les flux annuels en nitrate et la lame d'eau écoulée apparaissent fortement corrélés et la concentration moyenne pondérée par les débits apparaît peu variable.

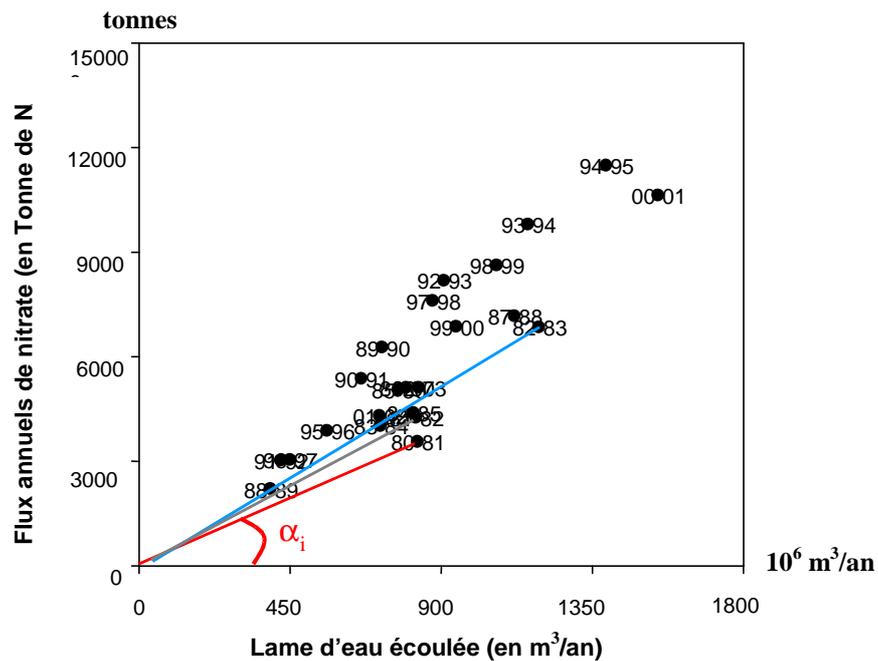


Figure 2 : Représentation de la concentration moyenne annuelle en nitrate pondérée par les débits (tangente de l'angle α) sur un graphique représentant les flux annuels en nitrate en fonction des débits annuels (ou lame d'eau écoulée).

● **RÉFÉRENCES**

Kauark Leité L.A., 1990. Réflexion sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole. Thèse de sciences appliquées ENPC.

MODES DE CALCUL DES FLUX MOYENS ANNUELS

CE QU'IL FAUT RETENIR

Il existe plusieurs méthodes de calcul des flux moyens annuels qui peuvent conduire à des résultats sensiblement différents.

4 MODES DE CALCUL DES FLUX MOYENS ANNUELS SELON LA DISPONIBILITE DES DONNEES

Données de débit (Q_j) et de concentration (C_j) journalières mesurées au même instant

Mode de calcul :

$$1. F_{journalier} = Q_j \times C_j \quad \text{avec } F \text{ Flux}$$

$$2. F_{annuel} = \sum_{j=1}^{j=365} Q_j \cdot C_j$$

Remarque :

- Pour les nitrates, l'usage est d'exprimer les flux en kg ou en tonne d'azote nitrique (N-NO₃).
- Pour le calcul des flux de nitrate, il n'est pas indispensable que le débit et la concentration soient mesurés au même instant car les fluctuations de concentration de nitrate sont lentes.
- Pour le phosphore, l'estimation du flux peut être fortement erronée si les concentrations et les débits ne sont pas mesurés au même instant car les concentrations de phosphore fluctuent fortement et rapidement avec les débits (*voir fiche B-6*).

Données de débit journalières mais données de concentration non journalières

Dans le cas où les données de concentration ne sont pas journalières, il ne faut pas qu'il y ait un laps de temps trop important entre deux données pour que le calcul des flux soit correct (proche du flux réel). Dans les travaux du bureau d'étude SOGREAH suite aux travaux de J. Vinson, l'écart temporel entre deux mesures est fixé à un maximum de 100 jours (*voir fiche E-8*).

Mode de calcul :

1. Interpolation des données de concentration pour obtenir une chronique de concentration journalière (voir fiche E-8)
2. puis calculer le flux annuel

$$2.1 \quad F_{\text{journalier}} = Q_j \times C_j \quad \text{avec} \quad F \text{ Flux}$$

C_j Concentration journalière

$$2.2 \quad F_{\text{annuel}} = \sum_{j=1}^{j=365} Q_j \cdot C_j \quad Q_j \text{ Débit journalier}$$

● **Données de débit et de concentration non journalières mais mesurées le même jour**

Mode de calcul :

1. $F_j = Q_j \times C_j$ avec F_j Flux journalier
 C_j Concentration journalière
2. $F_j \text{ moyen} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n}{n}$
 Q_j Débit journalier
 n nombre de données disponibles

$$3. \quad F_{\text{annuel}} = F_j \text{ moyen} \times 365$$

● **Données de débit et de concentration non journalières et mesurées des jours différents**

Mode de calcul :

1. Calcul du débit moyen annuel (Q_{ma})
2. Calcul de la concentration moyenne annuelle (C_{ma})
3. Calcul du flux moyen annuel (F_{ma})

$$F_{ma} = Q_{ma} \times C_{ma}$$

Cette méthode conduit la plupart du temps à une sous-estimation significative du flux (pour les BV à profil normaux) et parfois à une surestimation (pour les BV à profil inversés). Cette erreur a pour origine la différence entre la moyenne arithmétique des concentrations qui est ici prise en compte (et appelée C_{ma}) et la moyenne pondérée par les débits.

HYDRAULICITE, CORRECTION DE L'EFFET DE LA PLUVIOSITE : FLUX D'AZOTE PONDERE PAR L'HYDRAULICITE



PROBLEMATIQUE : POURQUOI CORRIGER L'EFFET DE LA PLUVIOSITE ?

Le flux d'azote est le résultat du produit du débit par la concentration en nitrate.

A l'échelle annuelle, le flux est très dépendant du débit, donc de la pluviométrie. Les variations de flux liées aux changements de pratiques agricoles sont difficilement détectables à partir de l'étude de l'évolution des flux annuels d'azote au cours du temps puisque l'essentiel de la variation du flux est liée à la variabilité climatique inter-annuelle.

Il apparaît donc nécessaire de corriger la variation du flux de l'effet de la variabilité climatique pour mettre en évidence l'impact d'un changement de pratiques agricoles sur les flux à l'exutoire.



CE QU'IL FAUT RETENIR

- L'hydraulicité est le rapport du débit annuel (ou mensuel) à sa moyenne interannuelle. Elle permet de positionner simplement une année par rapport à une année "normale".
- Le flux annuel d'azote pondéré par l'hydraulicité est un indice pertinent, permettant de corriger en partie la valeur des flux de l'effet de la variabilité climatique. Sa variabilité inter-annuelle est plus forte que la variabilité des concentrations. Mais, par rapport à ces dernières, l'intérêt de cet indicateur est qu'il s'agit d'une valeur de flux, qui peut être comparée à un solde de bilan agronomique dans le bassin versant.
- Dans le cas où la variation des flux n'est imputable qu'à la variation des débits (par exemple lorsque la moyenne des concentrations est stable au fil du temps), la pondération des flux par l'hydraulicité, corrigera parfaitement la variabilité inter-annuelle des flux. Par contre, la correction des flux par l'hydraulicité ne corrigera pas une variabilité des concentrations en nitrate due aux changements de condition de milieu (température, saturation), conséquences des variations climatiques, et qui modifient le cycle de l'azote.
- Les années hydrologiques présentant un climat très particulier (année très sèche ou très humide) et dont le débit s'écarte fortement de la tendance moyenne, doivent néanmoins faire l'objet d'une analyse spécifique.



HYDRAULICITE

L'hydraulicité est le rapport du débit annuel (ou mensuel) à sa moyenne interannuelle. Elle permet de positionner simplement une année par rapport à une année "normale" (hydraulicité = 1).

L'hydraulicité prend la valeur 1 lorsque l'année correspond à une année moyenne hydrologique. Elle est supérieure à 1 pour les années plus humides et inférieure à 1 pour les années plus sèches.

● Calcul de l'hydraulicité pour chaque année hydrologique (H_a)

$$H_a = \frac{Q_a}{Q_{moyen}}$$

avec, Q_a lame écoulee l'année a

Q_{moyen} lame écoulee moyenne inter-annuelle

● Illustration

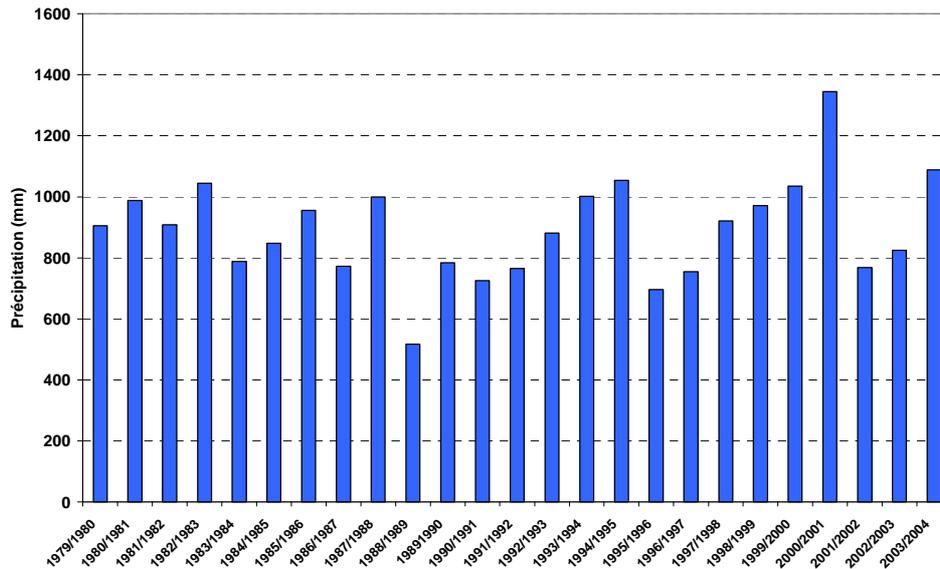


Figure 1 : Pluviométrie moyenne estimée par année hydrologique sur l'ensemble du BV du Gouët.

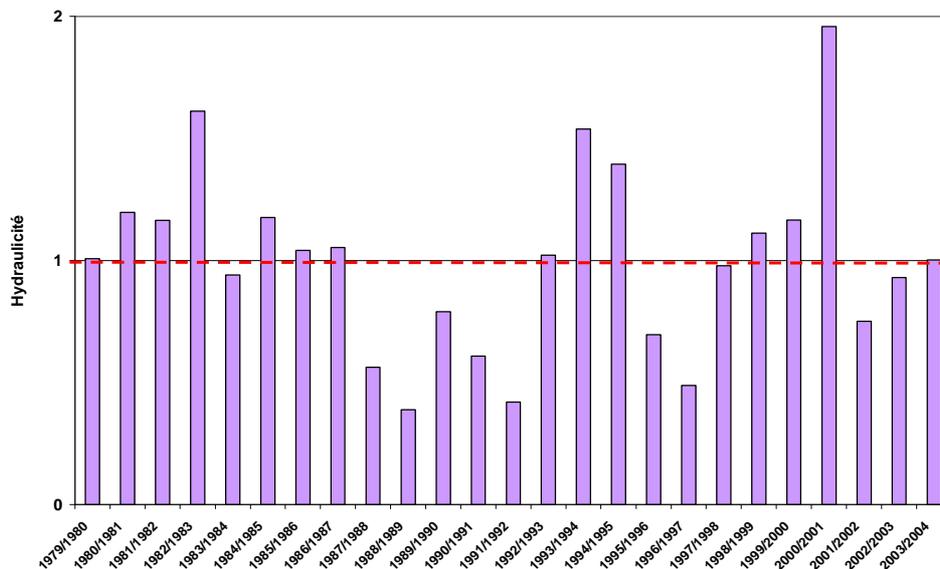


Figure 2 : Evolution de l'hydraulicité (St Julien, bassin versant du Gouët).
La moyenne inter-annuelle est égale à 1 (pointillé rouge)

La Figure 1 montre que la courbe de pluviométrie illustre de manière insuffisante la variabilité climatique inter-annuelle : entre une année sèche comme 1995-1996 où les précipitations sont légèrement inférieures à 700 mm et une année exceptionnellement humide comme 2000-2001 où les précipitations sont de l'ordre de 1350 mm, il n'y a qu'un rapport proche de 2.

Pour les mêmes années, le rapport d'hydraulicité (Figure 2) est proche de 4. L'hydraulicité rend mieux compte de l'impact de la variabilité climatique sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants.

● FLUX D'AZOTE PONDÉRE PAR L'HYDRAULICITE

● Définition de l'indicateur

Auteur :

Le flux pondéré par l'hydraulicité a été défini par G. Marjolet (hydrogéologue du Conseil Général des Côtes-d'Armor) en 2004 dans le cadre d'une étude sur les bassins versants du Gouët, de l'Arguenon et du Haut-Blavet.

Données :

Chronique des débits journaliers (Q_j) sur n années

Chroniques des concentrations en nitrate journalières, bi-mensuelles ou mensuelles (C)

Mode de calcul :

Les calculs sont réalisés par [année hydrologique](#).

- Calcul du flux d'azote annuel par année hydrologique :
 - si des données journalières de concentration en nitrate sont disponibles, le flux d'azote pour l'année a est donné par

$$\Phi_a = \sum_{j=1}^{j=365} C_j \cdot Q_j \quad \text{avec} \quad C_j \text{ concentration journalière}$$

Q_j débit journalier

- si les données de concentration ne sont pas journalières, il faut interpoler les données disponibles pour obtenir des valeurs journalières puis calculer des flux annuels.
 - Pour les nitrates, l'usage est d'exprimer les flux en kg ou en tonnes d'azote nitrique (N-NO_3^-).
- Calcul du flux annuel d'azote pondéré par l'hydraulicité pour chaque année hydrologique :

$$\Phi_{H_a} = \frac{\Phi_a}{H_a}$$

- Dans l'absolu, à concentration constante, les flux ne dépendraient que du débit ou des lames d'eau écoulées. En pondérant le flux par l'hydraulicité, on pourrait ainsi lisser totalement la variabilité du flux due à la variabilité des débits et des précipitations. Dans la réalité, la variabilité des flux a des causes plus complexes et la pondération des flux par l'hydraulicité ne permet d'éliminer qu'une part de la variabilité des flux.

Unité :

Le flux pondéré par l'hydraulicité est exprimé en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$.

● Illustration

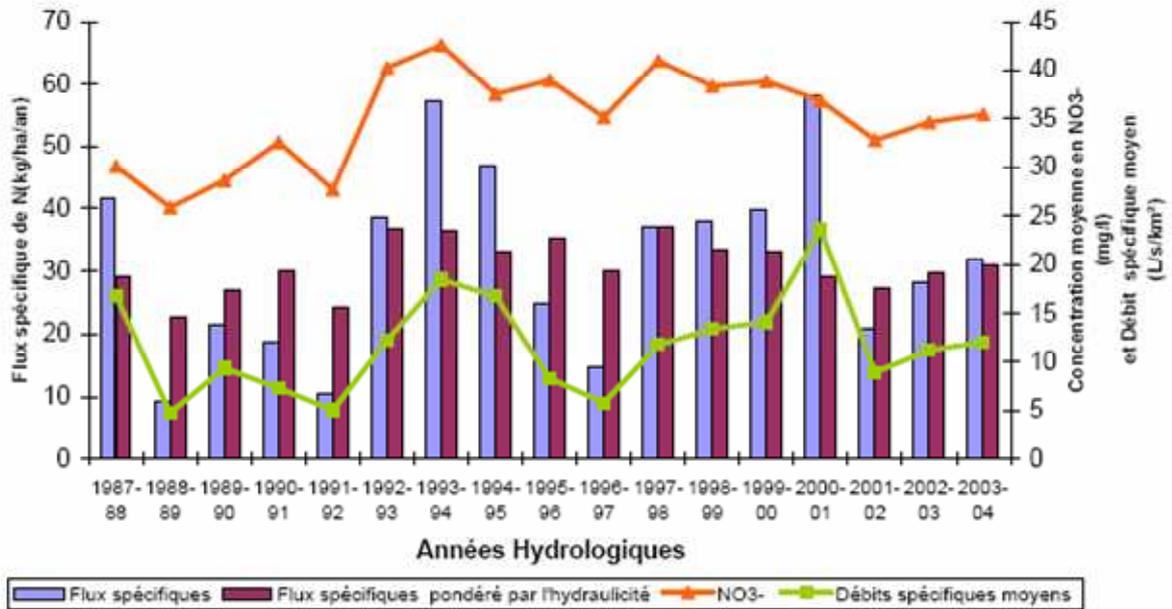


Figure 3 : Flux d'azote, flux pondéré par l'hydraulicité et concentration moyenne en nitrate par année hydrologique dans le bassin versant du Gouët.

La comparaison de la dynamique des flux annuels d'azote, des concentrations moyennes annuelles et des flux pondérés par l'hydraulicité (Figure 3) montre que le flux pondéré par l'hydraulicité a une **variabilité inter-annuelle intermédiaire par rapport** :

- au flux d'azote, qui présente une forte variabilité (comparable à celle du débit), et
- à la moyenne annuelle des concentrations, qui présente une variabilité plus faible.

METHODE POUR DEFINIR DES OBJECTIFS DE QUALITE EN CONCENTRATION, EN FLUX ET EN BILAN DANS DES BASSINS VERSANTS

DEFINITIONS

 **Le bilan agronomique et l'excédent du bilan d'azote** constitue un "indicateur premier" dont il est indispensable de disposer dans le cadre du diagnostic et dans le cadre du suivi d'un programme de reconquête de la qualité des eaux vis-à-vis des nitrates.

L'excédent du bilan correspond à l'azote qui n'est pas assimilé par les plantes. Il s'agit donc d'un excédent qui est susceptible de se transformer pour tout ou partie en flux d'azote.

On peut donc écrire l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Excédent du Bilan} &= \text{Flux} + \text{Défaut de flux} \quad \text{ou} \\ \text{Excédent du Bilan} &= \text{Flux} + \text{Abattement} \end{aligned}$$

 **L'abattement** recouvre un ensemble de mécanismes compensateurs d'un bilan azoté excédentaire. On considère habituellement que cet **abattement** ou **défaut de flux** est pour l'essentiel attribuable à des **phénomènes de dénitrification** même si sans doute l'abattement recouvre aussi des **phénomènes de volatilisation et de réorganisation de l'azote dans la matière organique**.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Le programme de reconquête de la qualité des eaux en nitrate doit être piloté sur la base des concentrations, des flux et du bilan d'azote.
- Fixer simultanément pour un bassin versant des objectifs en terme de concentration, flux et bilan nécessite de disposer d'une méthodologie qui garantisse la cohérence hydrologique et hydrochimique entre ces trois grandeurs.

OBJECTIF

Comment se fixer des objectifs de résorption en nitrate par bassin versant ?

OUTILS

L'excédent du bilan doit être mesuré bassin versant par bassin versant.

A défaut d'une mesure, on peut utiliser un modèle comme le suivant (Figure 1) et estimer le bilan spécifique à partir de la connaissance du flux spécifique. Mais cette méthode d'estimation du bilan ne doit être utilisée qu'à défaut et il est important d'évaluer directement le bilan à partir des composantes de ce bilan.

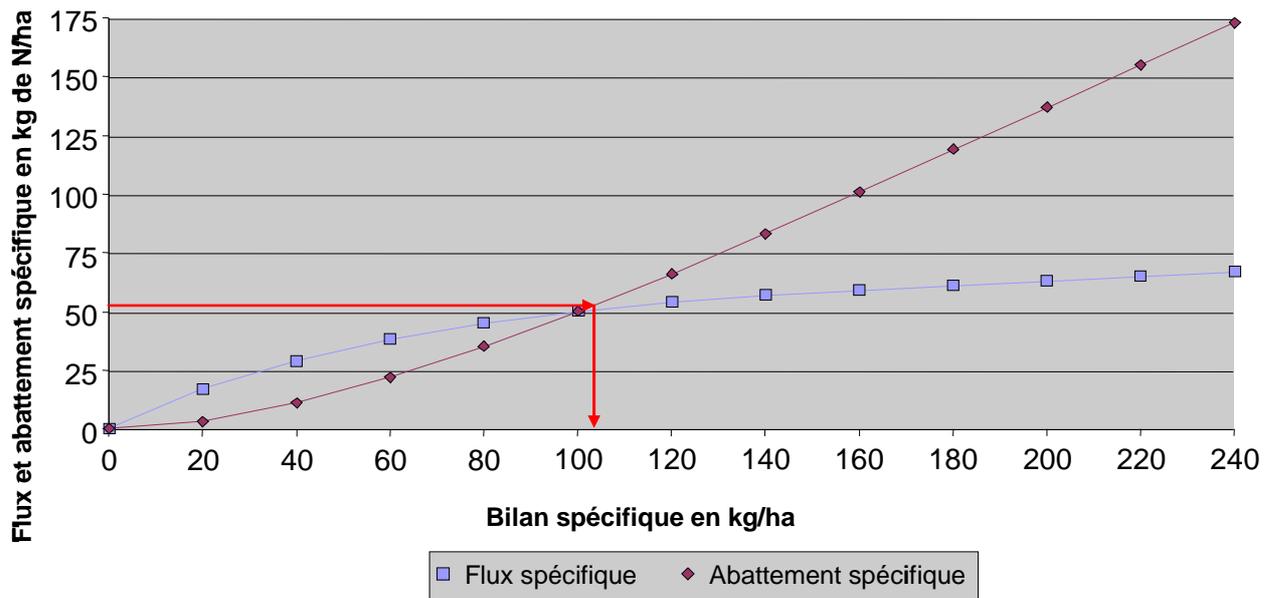


Figure 1 : Evolution du flux spécifique et de l'abattement spécifique en fonction du bilan spécifique (en kg de N/ha). Aurousseau, comm. Pers.

NB : pour plus de détail sur la méthode d'utilisation de ce modèle, voir plus en avant dans cette fiche.

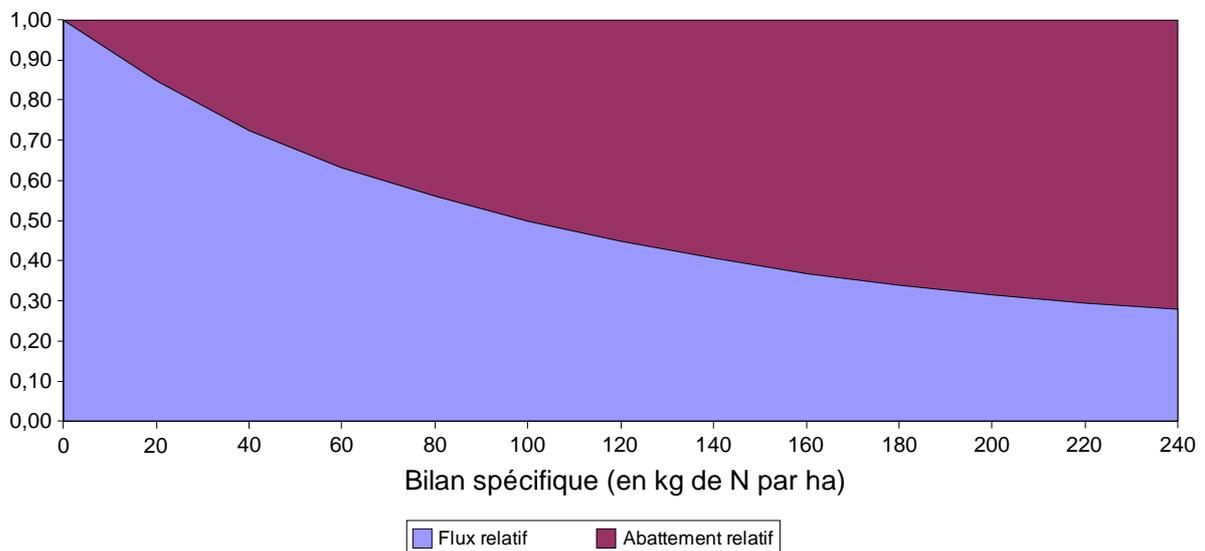


Figure 2 : Part relative du flux spécifique et de l'abattement spécifique en fonction du bilan spécifique (Aurousseau, comm. Pers).

La règle de partage entre le flux et l'abattement est que la part de l'abattement est faible dans les bassins versants où l'excédent du bilan est limité et la part de l'abattement augmente en fonction de l'augmentation du bilan (sans toutefois que la part du flux cesse d'augmenter en fonction de l'excédent du bilan) (Figure 2).

METHODE D'ESTIMATION DE L'EXCEDENT DU BILAN

Exemple à partir du bassin versant du Trieux (22)

Données

Pour estimer l'excédent du bilan, il faut disposer au moins des données suivantes :

- Superficie du bassin versant en hectare
- lame d'eau inter-annuelle en l/s/km²
- La moyenne arithmétique inter-annuelle des concentrations de nitrate en mg NO₃/l
- Le flux spécifique inter-annuel en kg/ha

1^{ère} étape : conversion de la lame d'eau

Les données connues sont sur fond bleu, les données calculées sur fond blanc.

	A	B	C	D	E	F
	Superficie	Lame d'eau	Lame d'eau	Lame d'eau	Lame d'eau	Lame d'eau
	Ha	l/s/km ²	m ³ /km ²	m ³ /ha	mm	m ³ /an
1	28625	13,3	419429	4194	419	120.061.494
Mode de calcul			$= \frac{B1 \times 3600 \times 24 \times 365}{1000}$	$= \frac{C1}{100}$	$= \frac{D1}{10}$	$= D1 \times A1$

Tableau 1 : Conversion de la lame d'eau

2nd étape : calcul du flux et de la concentration pondérée par les débits

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Superficie			Lame d'eau			Moyenne arithmétique des concentrations	Flux spécifique	Flux	Concentration pondérée par les débits	Rapport de concentration
	Ha			m ³ /ha			mg NO ₃ /l	kg/ha	tonnes de N	mg NO ₃ /l	
1	28625			4194			41,7	51	1460	54	1,28
Mode de calcul									$= \frac{H1 \times A1}{1000}$	$= \frac{H1}{D1} \times 4,42 \times 1000$	$= \frac{J1}{G1}$

Tableau 2 : Méthode de calcul du flux, de la concentration pondérée par les débits et du rapport de concentration

Le rapport de concentration est un rapport entre la concentration pondérée par les débits et la moyenne arithmétique des concentrations.

• **3^{ème} étape : estimation de l'excédent du bilan à partir d'un exemple**

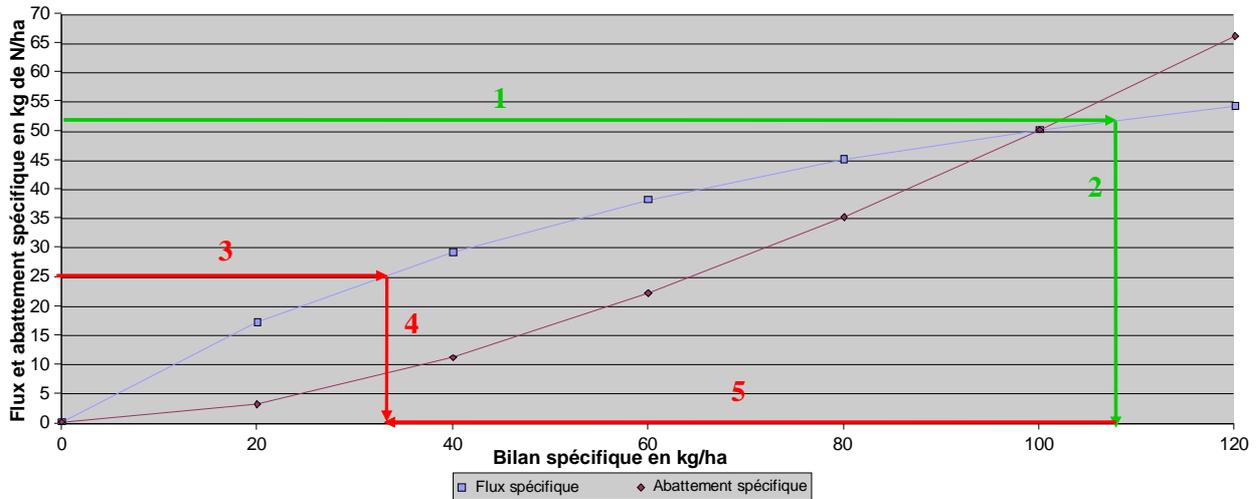


Figure 3 : Estimation de l'excédent du bilan spécifique (en kg de N /ha) appliqué à un exemple : bassin versant du Trieux (22). Aurousseau, comm. Pers.

La méthode d'estimation de l'excédent du bilan est simple : il faut faire comme indiqué par les flèches vertes numérotées 1 et 2 dans le modèle. Dans l'exemple du bassin versant du Trieux, dont le flux spécifique est de 51 kg N/ha, l'excédent du bilan spécifique estimé équivaut à environ 102 kg N/ha de bassin versant, soit un excédent inter-annuel du bilan de 2920 tonnes d'azote (Tableau 3).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Superficie	Lame d'eau					Moyenne arithmétique des concentrations	Flux spécifique				Excédent du bilan spécifique estimé	Excédent du bilan estimé
	Ha	l/s/km ²					mg NO ₃ /l	kg/ha				Kg/ha de BV	tonnes de N
1	28625	13,3					41,7	51				102	2920
Mode de calcul												Voir modèle (Figure 3)	$= \frac{K1 \times A1}{1000}$

Tableau 3 : Méthode de calcul de l'excédent du bilan inter-annuel

ESTIMATION DE L'EXCEDENT DU BILAN DANS UNE "SITUATION OBJECTIF"

Estimer l'excédent du bilan dans une " situation objectif", conduit à définir quel sera la réduction de l'excédent du bilan si l'on se donne des contraintes en terme de flux ou de concentration, dans le cadre par exemple d'un programme de reconquête de la qualité de l'eau.

A partir du même exemple, si l'on se donne pour objectif 25 kg N/ha de BV par an en terme de flux spécifique d'azote, l'excédent du bilan spécifique peut être estimé à 32 kg N/ha de BV (suivre les flèches rouges numérotées 3 et 4 dans la Figure 3).

On constate alors qu'il faut diminuer l'excédent du bilan spécifique par trois environ (de 102 kg /ha à 32 kg N/ha) pour obtenir une diminution (Figure 3, flèche 5) :

- du flux spécifique d'azote de 26 kg/ha (soit une diminution du flux de 744 tonnes)
- de la concentration pondérée par les débits de 28 mg NO₃/l (de 54 à 26 mg/l), qui doit se traduire par une baisse de la concentration moyenne arithmétique de 21,7 mg/l (de 41,7 à 20 mg/l). La concentration ainsi obtenue est estimée à partir du "rapport de concentration" (Tableau 4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Superficie			Lame d'eau			Moyenne arithmétique des concentrations	Flux spécifique	Flux	Concentration pondérée par les débits	Rapport de concentration	Excédent du bilan spécifique estimé	Excédent du bilan estimé
	Ha			m ³ /ha			mg NO ₃ /l	kg/ha	tonnes de N	mg NO ₃ /l		Kg/ha de BV	tonnes de N
Situation actuelle	28625			4194			41,7	51	1460	54	1,28	102	2920
Situation objectif	28625			4194			20	25	716	26	1,28	32	916
Etapes								1 objectif	2 calculé	5 Calculé		3 estimé	4 calculé

Tableau 4 : Calcul de l'excédent du bilan estimé, du flux et de la moyenne arithmétique des concentrations dans le cadre d'une situation objectif.

La relation entre la concentration pondérée par les débits et la moyenne arithmétique des concentrations est une relation complexe qui dépend de la chronique des concentrations en fonction du temps. L'utilisation d'un rapport de concentration illustré ici est une méthode très rustique pour établir la relation entre ces deux concentrations.

BASSIN VERSANT, SOUS-BASSIN VERSANT, TRONÇON DE BASSIN VERSANT ET CALCULS DE FLUX

● DEFINITION

 Le **bassin versant** est la surface qui alimente en eau un point de l'espace appelé exutoire. A un point de l'espace ou exutoire, correspond un bassin versant et son contour. A un bassin et à son contour, correspond un exutoire.

 Un **sous-bassin** versant est un petit bassin inclus dans un plus grand.

 Le **tronçon de bassin versant** est la superficie d'un bassin versant dont on a exclu les sous-bassins de l'amont.

 Les **masses d'eau** : parmi les masses d'eau que la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) demande de distinguer, il y a les masses d'eau continentales de surface qui correspondent à la définition hydrologique de bassins versants, de sous bassins versants et de tronçons de bassins versants.

● CE QU'IL FAUT RETENIR

Un des enjeux inhérents au découpage d'un bassin versant en sous-bassins concerne la question des tronçons de bassin et du calcul des flux attribuables à ces tronçons.

L'un des buts de la méthode de calcul de flux est d'évaluer dans quelle proportion un tronçon participe à la qualité des eaux d'un bassin versant et d'un sous-bassin.

La méthode de calcul des flux permet et déterminer la contribution aux flux du bassin versant, des sous-bassins versants et tronçons, et ensuite d'établir des hiérarchies afin de définir les zones prioritaires d'action pour la reconquête de la qualité des eaux.

● ORGANISATION DE L'ESPACE ET CALCUL DE FLUX

Bien connaître les limites d'une masse d'eau, d'un bassin versant, d'un sous-bassin versant et d'un tronçon est une étape indispensable dans la réalisation d'un diagnostic de la qualité de l'eau.

Réaliser un tel découpage est l'étape préalable au calcul de flux, qui s'effectue par sous-bassin et bassin versant. C'est surtout une condition nécessaire pour lancer correctement un logiciel de calcul de flux.

Il est recommandé pour chaque bassin et chaque sous-bassin de réaliser une fiche « station » et une fiche « paramètres » ou « constantes ».

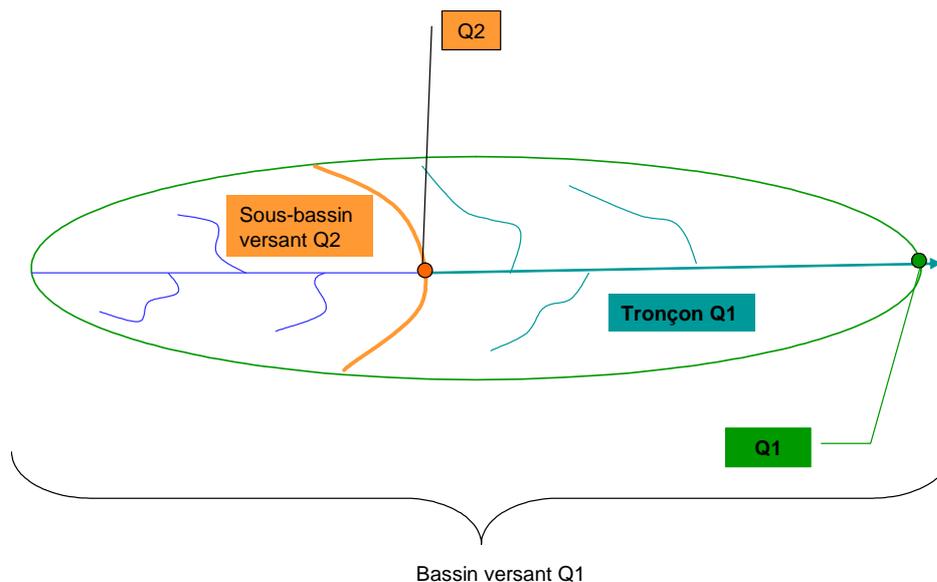


Figure 1 : identification du bassin versant, sous- bassin versant et tronçon de bassin versant.

LES LIMITES GEOGRAPHIQUES

Masses d'eau

Les objectifs de qualité de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) sont définis par rapport à la notion de masses d'eau. Les états membres sont tenus d'effectuer l'inventaire des masses d'eau qui peuvent être :

- continentales :
 - superficielles : les cours d'eau, les cours d'eau fortement modifiés (par exemple les canaux), les lacs et étangs. Dans le cas des masses d'eau continentales superficielles de type cours d'eau ou cours d'eau fortement modifiés, il y a pour chacune de ces masses d'eau une correspondance soit avec la notion de bassin versant, soit de sous-bassin, soit de tronçon de bassin versant ;
 - souterraines : nappes phréatiques entre autres ;
- côtières et maritimes
- de transition : estuaire, rias, etc., c'est-à-dire toutes les masses d'eau au carrefour entre eaux douces et eaux salées.

- **Bassin versant**

Le bassin versant Q est la surface qui alimente en eau l'exutoire situé au point Q. La superficie de ce bassin versant est de 5021 ha.

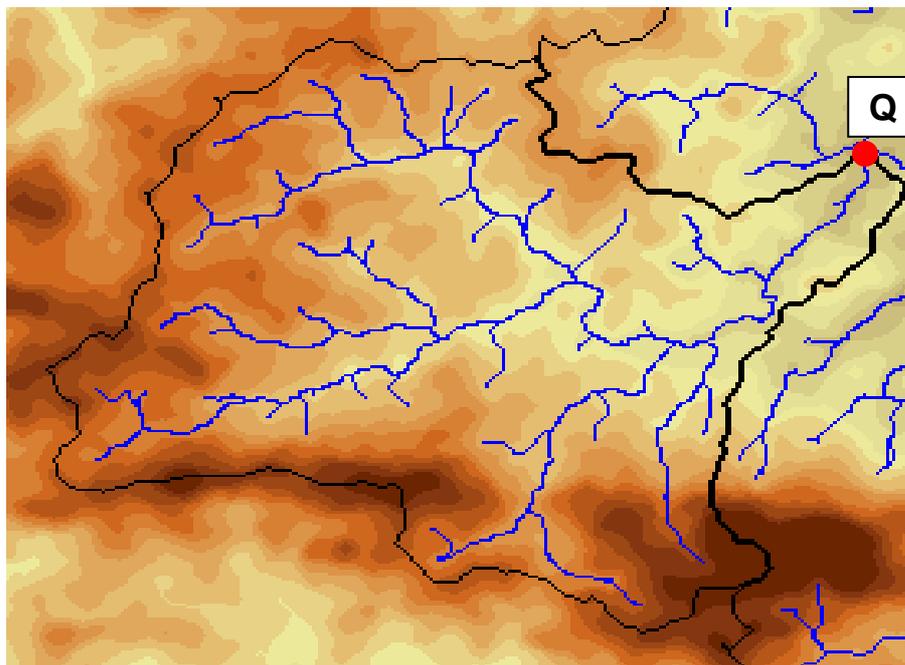


Figure 2 : contours géographiques d'un bassin versant Q.

- **Sous-bassin versant**

Trois sous-bassins sont distingués à l'amont : les sous-bassins C4, C7 et C8 situés à l'amont des exutoires C4, C7 et C8, et ayant respectivement pour superficie : 800, 1725 et 1345 ha.

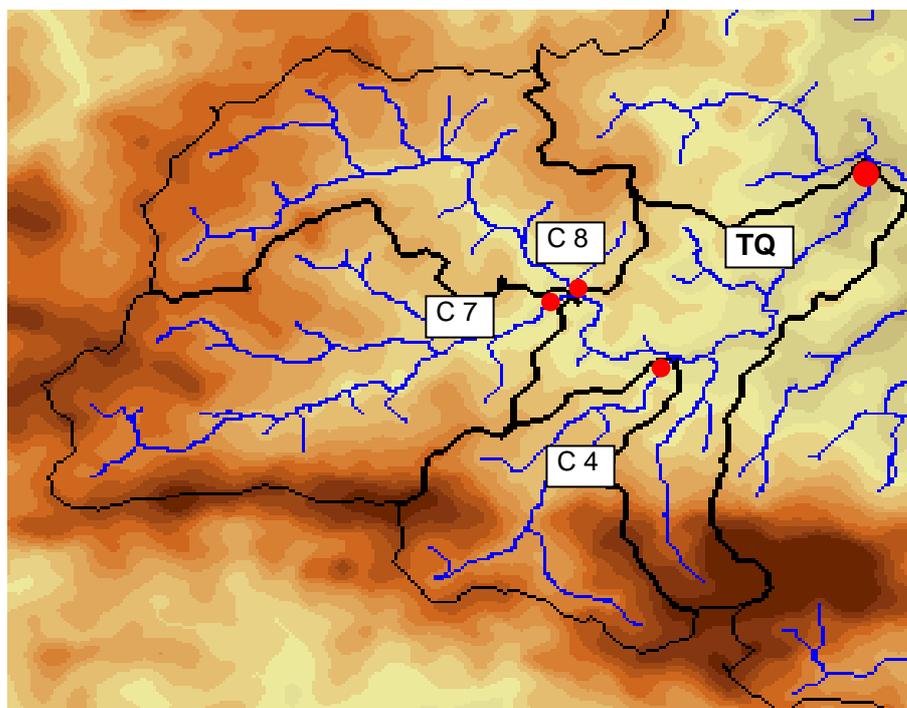


Figure 3 : contours géographiques des sous-bassins versants.

Tronçon de bassin versant

Le bassin Q est composé de trois sous-bassins amont (C4, C7 et C8) et du tronçon noté TQ.

Les caractéristiques du tronçon de bassin versant TQ résultent des données connues pour le bassin Q et les sous-bassins C4, C7 et C8.

La superficie du tronçon TQ est égale à la différence entre la superficie du bassin Q (5021 ha) et la somme des superficies des trois sous-bassins amont (800+1725+1345 ha).

La superficie du tronçon TQ est donc de 1151 ha.

De même, on pourra calculer la contribution au flux (par exemple d'azote) du tronçon TQ en soustrayant au flux du bassin principal Q (136 tonnes de N), la somme des flux produits par les trois sous-bassins amont (29, 36, 44).

Il en résulte que la contribution du tronçon TQ est de 27 tonnes d'azote.

On pourra ensuite calculer les flux spécifiques des différents bassins, sous-bassins et tronçons. Ce qui permet, en dernier lieu, d'établir un « arbre de contributions », comme celui présenté ci-dessous :

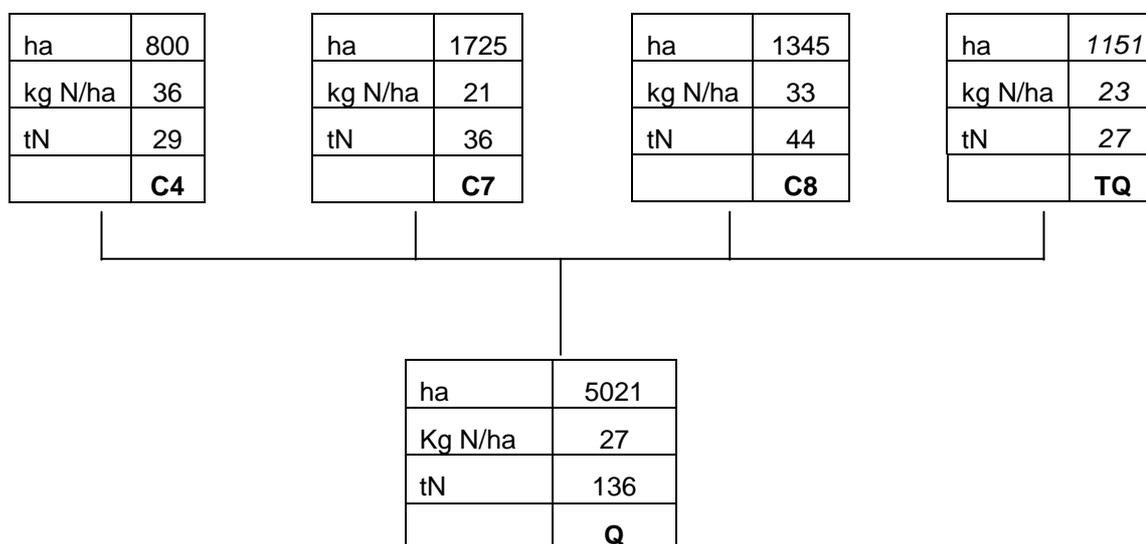


Tableau 1 : arbre des flux type obtenu suite à un calcul de flux d'azote (kg N/ha).

Les calculs pour le tronçon TQ sont :

$$S(TQ) = S(Q) - S(C4+C7+C8) = 5021 - (800+1725+1345) = 1151 \text{ ha}$$

$$\text{Flux}(TQ) = \text{Flux}(Q) - \text{Flux}(C4+C7+C8) = 136 - (29+36+44) = 27 \text{ tonnes de N (tN)}$$

$$\text{Flux spécifique}(TQ) = 27 \text{ 000 kg N} / 1151 \text{ ha} = 23 \text{ kg N/ha}$$

● Application du calcul de flux d'azote à l'exemple du bassin versant de l'Ic

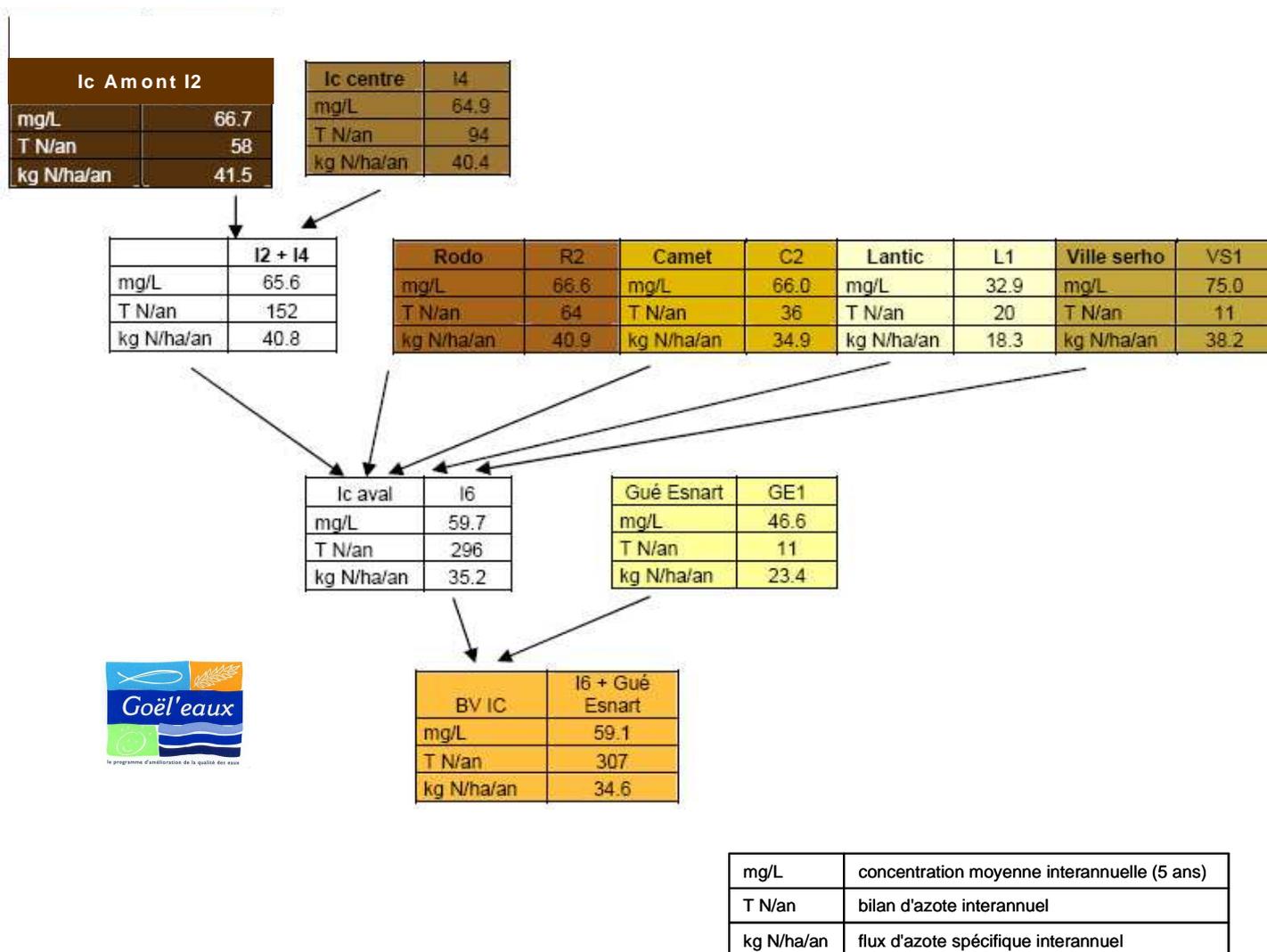
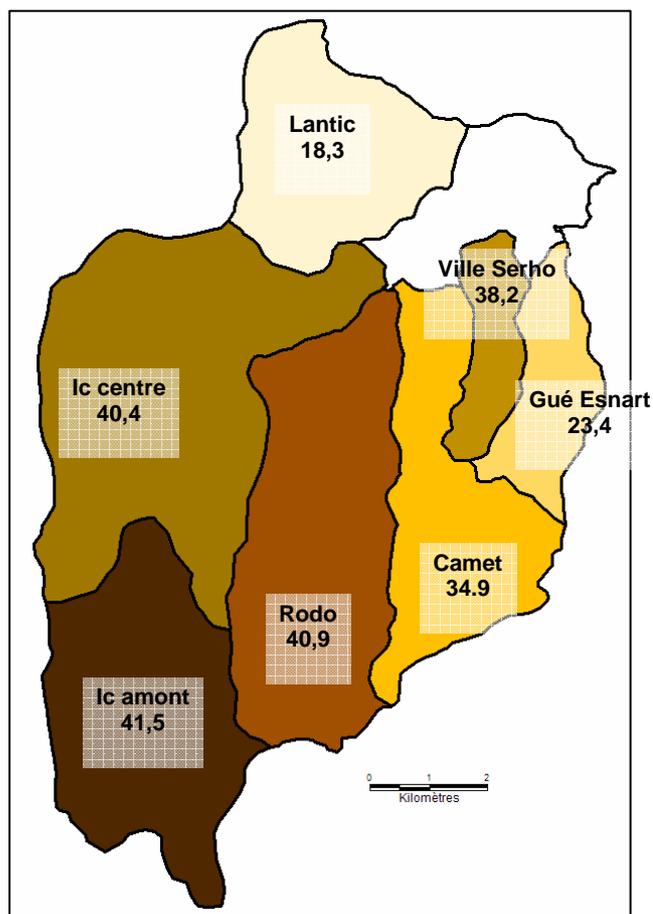


Tableau 2 : arbre des concentrations et flux d'azote sur l'Ic (SMCG/GOËL'EAUX - Côtes d'Armor)

Le but d'un tel procédé est d'évaluer dans quelle(s) proportion(s) un tronçon ou un sous-bassin participe à la qualité des eaux d'un bassin versant. Cet exemple relatif au bassin versant de l'Ic concerne l'azote.



Flux d'azote spécifique moyen (kg N/ha/an) pendant la période 2001-2006

Figure 4 : cartographie des zones prioritaires hiérarchisées sur le bassin versant de l'Ic
(Source : SMCG/GOËL'EAUX - Côtes d'Armor 2007.)

La méthode de calcul des flux permet d'identifier et de hiérarchiser les zones d'action prioritaires. La cartographie de "l'arbre des flux", simultanément avec une présentation cartographique du découpage du bassin versant correspondant en sous-bassins et en tronçons, facilite la hiérarchisation des zones prioritaires.

● Application du calcul de flux de phosphore à l'exemple du bassin du Gouët

La méthode de calcul et de présentation des flux peut être appliquée à la problématique des flux de phosphore. L'exemple ci-dessous concerne le bassin versant du Gouët et les données de phosphore total (exprimé en mg/l de P Total). On notera que les valeurs numériques des flux et des flux spécifiques calculés ici sont sans doute significativement sous-estimés compte tenu du protocole de suivi qui a été appliqué à cette problématique du phosphore total. Pour les protocoles de suivi, on se reportera aux fiches G



Figure 5 : cartographie du bassin versant du Gouët et ses sous-bassins versants (SMBG, 2007).

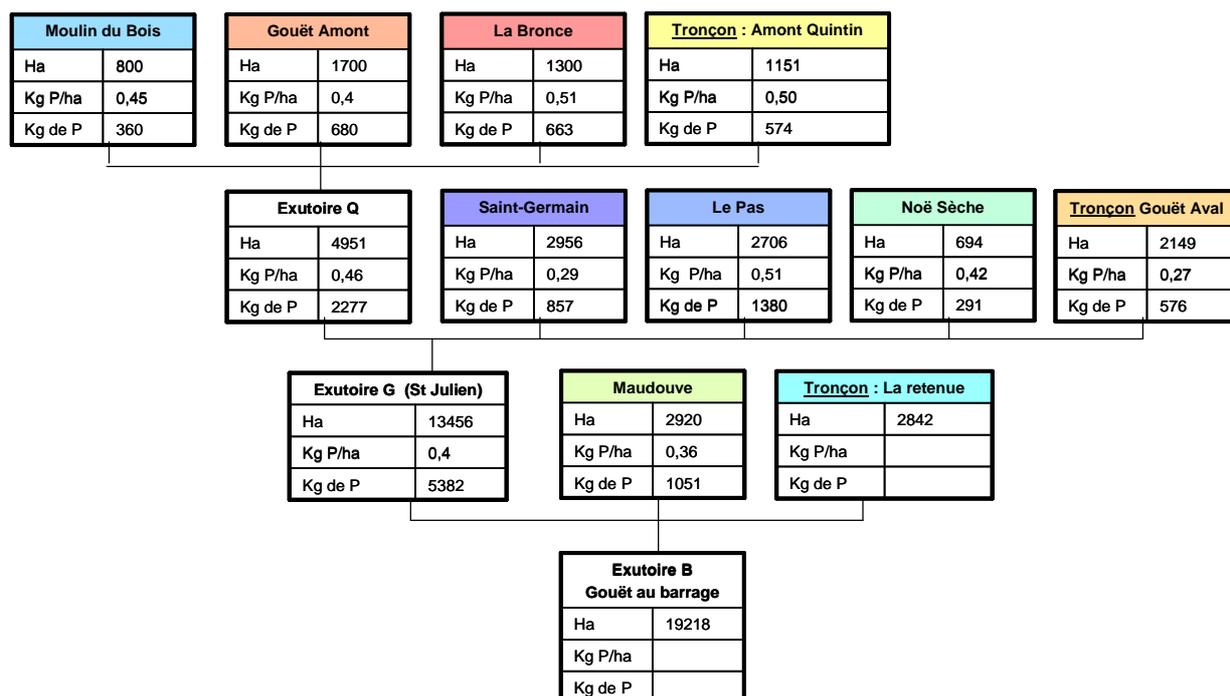


Tableau 3 : Arbre des flux de phosphore sur le bassin versant du Gouët, (SMBG, 2007).

Le suivi des teneurs en phosphore total à l'exutoire du bassin versant (B au barrage) ne permet pas de calculer les flux de phosphore, et par conséquent il n'est pas possible non plus de les calculer pour le tronçon "la retenue".

Avec ce type de présentation, on pourrait [apprécier la capacité d'autoépuration \(concernant l'azote ou le phosphore\) d'une retenue située sur un tronçon](#) et éventuellement de [détecter une « anomalie » quantitative et/ou qualitative sur les données.](#)

METHODE D'INTERPOLATION DE DONNEES MANQUANTES DANS UNE SERIE DE DONNEES CHRONOLOGIQUE

DEFINITION

 **Interpolation** : opération qui consiste à intercaler, par calcul, des termes entre des suites de nombres.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Une interpolation linéaire entre deux données de concentration est couramment la méthode utilisée pour compléter une série de données et calculer des flux.
- Les concentrations journalières sont calculées grâce à une **régression linéaire** entre deux mesures, afin de se caler sur la chronique des débits journaliers.
- Le comblement des séries de concentration est réalisé dans le contexte où les mesures de concentration ne sont pas quotidiennes.
- L'écart temporel maximal entre deux mesures de concentration ne doit pas dépasser 100 jours, soit environ trois mois.
- Cette méthode ressort comme étant la plus simple et la plus efficace pour interpoler une valeur manquante entre deux mesures de concentration ou pour combler toute une période manquante.

COMPLEMENT DES SERIES DE CONCENTRATION DE NITRATE ?

Le comblement des séries de concentration est réalisé dans le contexte où les mesures de concentration ne sont pas quotidiennes. Des valeurs journalières sont alors reconstituées par interpolation. Dans le cas où toute une période manque, cette période ne doit pas dépasser 100 jours.

La régression linéaire

Les concentrations journalières sont calculées grâce à une **régression linéaire** entre deux mesures, afin de se caler sur la chronique des débits journaliers.

Cette méthode de comblement des séries de concentration a été choisie d'après les travaux de Julie Vinson (2003). En effet, cette méthode permet d'obtenir de meilleurs résultats au niveau des calculs de flux par rapport à deux autres méthodes testées qui sont :

- la moyenne inter annuelle : pour calculer un mois de janvier manquant, on prend la moyenne des concentrations sur tous les autres mois de janvier de la station ;

- une relation entre débit et concentration : pour calculer un mois de janvier manquant, on calcule le débit moyen de ce mois, on prend le mois de janvier ayant la valeur de débit la plus proche parmi les autres années, puis on calcule la concentration moyenne en nitrates pour ce mois, qui est retenue comme valeur du mois de janvier manquant.

La fréquence de mesures des concentrations est généralement au moins mensuelle. Néanmoins, elle peut varier d'une année sur l'autre et il peut y avoir plusieurs mois sans mesure, en particulier avant les années 1990. Or, étant donné le caractère oscillant et cyclique des concentrations au cours des mois et des années, il est important de limiter l'écart entre deux dates de mesures pour limiter l'impact de la régression linéaire. C'est pourquoi, pour l'interpolation, **l'écart temporel maximal entre deux mesures de concentration a été fixé à 100 jours**, soit environ trois mois (Vinson, 2003).

D'autre part, cette méthode ressort comme étant la plus simple et la plus efficace pour interpoler une valeur manquante entre deux mesures de concentration ou pour combler tout un mois manquant. Cependant, l'auteur précise que ce résultat ne peut s'appliquer qu'aux exemples présentés dans son étude et que les séries chronologiques qui ne respectent pas les critères suivants doivent être rejetées et qu'en conséquence les méthodes de comblement des données manquantes dans de telles séries ne doivent être appliquées que dans les conditions suivantes :

- au moins une mesure de concentration par mois ;
- au maximum trois mois dans une année avec des suivis manquants (soit minimum 9 suivis par an), si les trois mois ne sont pas tous en hiver ;
- au maximum deux mois consécutifs sans mesures ;
- au maximum 5 années présentant des suivis manquant dans la série chronologique étudiée.

Remarque : l'auteur précise que quoiqu'il en soit la méthode d'interpolation par régression linéaire a peu d'impact sur le calcul de flux. En effet, le flux est obtenu en multipliant le débit par la concentration. Or, les débits varient dans un intervalle de 0 à 20 000 l/s (dans les exemples étudiés dans cette étude), alors que les concentrations varient entre 0 et 130 mg/l. ce sont donc plutôt les débits qui conditionnent le flux compte tenu de leur échelle de variation beaucoup plus importante.

Une interpolation linéaire entre deux données de concentration est couramment la méthode utilisée pour compléter une série de données et calculer des flux. Cependant, il faut observer que durant la période de temps entre deux échantillons, le débit d'eau peut avoir beaucoup varié et par conséquent, les concentrations aussi. L'utilisation de l'interpolation linéaire génère donc des erreurs dans le calcul des flux (Birgand F., comm pers.).

RÉFÉRENCE

- **Vinson J., 2003.** Calculs des flux annuels et des flux spécifiques annuels d'azote nitrique des principaux fleuves et rivières de Bretagne. Rapport d'étude DIREN-Agrocampus. 65p.
http://www.bretagne.ecologie.gouv.fr/Eau/Publications/Etudes/PDF/Calcul_flux_azote.pdf

METHODE D'EXTRAPOLATION SPATIALE DES DONNEES DE DEBIT

● DEFINITION

 Extrapolation : action d'introduire des termes non en dedans mais en dehors d'une série.

 L'extrapolation spatiale consiste à estimer la valeur d'une variable en un point où cette variable n'a pas été mesurée.

● CE QU'IL FAUT RETENIR

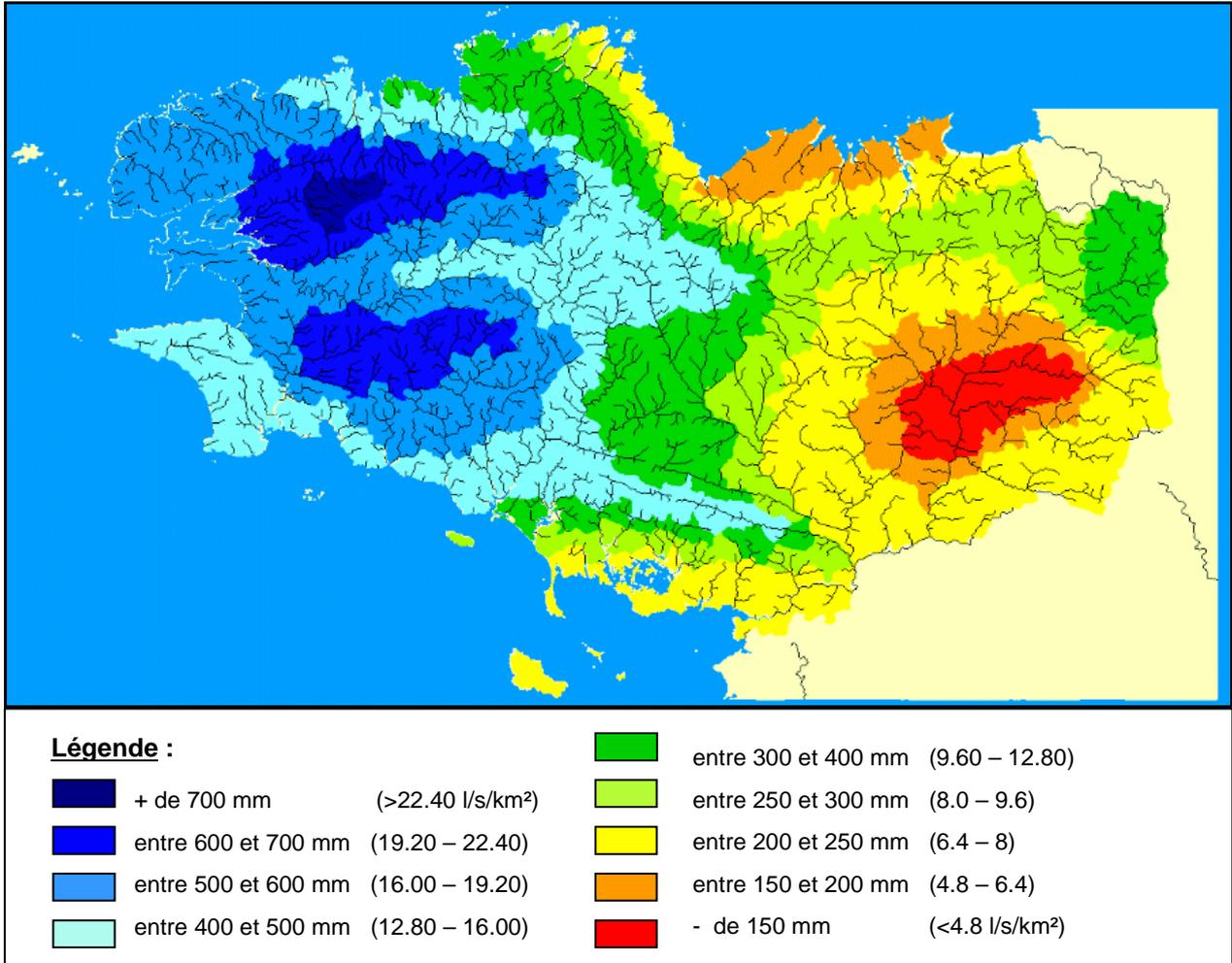
La technique traditionnelle d'extrapolation des débits est une technique dite "au prorata des surfaces des bassins versants". Son utilisation présuppose l'invariabilité des lames d'eau écoulées sur la superficie de la région étudiée. Cette hypothèse est difficilement admissible car il existe une forte variabilité dans la distribution spatiale des pluies et des lames d'eau écoulées. Dans une région comme la Bretagne, les pluies et les lames d'eau écoulées sont beaucoup plus élevées à l'ouest qu'à l'est et il y a aussi un facteur "distance à la côte" qui joue un rôle important dans cette distribution géographique.

● EXTRAPOLATION DES DEBITS ET DES LAMES D'EAU ECOULEES

Quand la station « débit » n'est pas superposée à la station « qualité » sur un bassin versant, il est nécessaire d'extrapoler les débits à la station « qualité ».

Lorsqu'une lame d'eau n'est pas mesurée sur un point du bassin versant, elle peut être estimée par extrapolation à partir des données mesurées au point le plus proche.

L'estimation d'une lame d'eau a longtemps été réalisée au prorata de la surface du bassin versant correspondant. Or, cette méthode ne tient pas compte de la [variabilité régionale des précipitations](#).

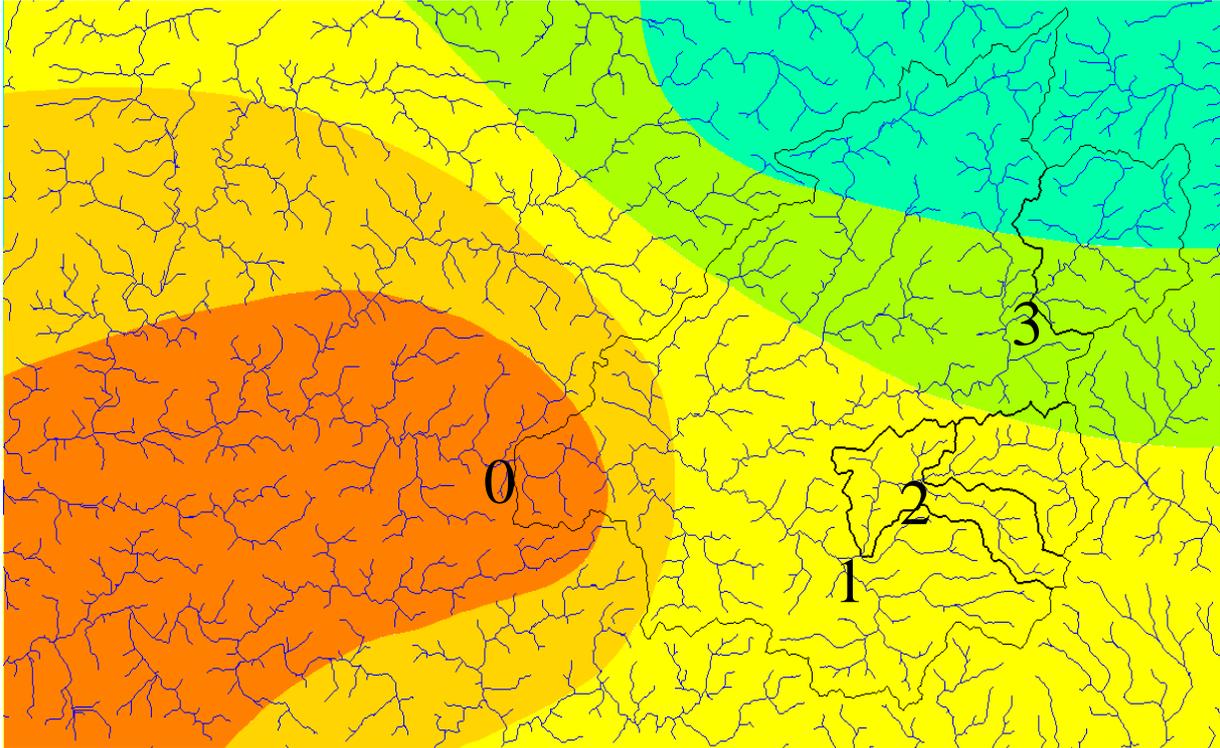


Carte 1 : Répartition des modules spécifiques sur la base des données inter-annuelles. Dans une région comme la Bretagne, les pluies et les lames d'eau écoulées sont beaucoup plus élevées à l'ouest qu'à l'est. A l'est de la région le facteur distance à la côte joue aussi un rôle important dans la distribution spatiale de ces modules spécifiques

La méthode la plus cohérente pour estimer une lame d'eau est une estimation au prorata du rapport de lame d'eau.

Les données de lame d'eau ont été estimées à partir d'une base de données des lames d'eau en Bretagne établie à partir des données moyennes inter-annuelles.

Pour illustrer l'apport de cette méthodologie, on prendra l'exemple de la Vilaine à l'amont de Rennes (Carte 2).



Carte 2 : Répartition des modules spécifiques sur la base des données inter-annuelles du bassin versant de la Vilaine à l'amont de Rennes. Même légende que pour la Carte 1.

Prenons quatre stations limnimétriques pour lesquelles on connaît :

- œ la superficie de son bassin versant
- œ la lame d'eau écoulee inter-annuelle (fournie par la banque hydro)
- œ la lame d'eau estimée à partir de la base de donnée présentée ci-dessus.

On suppose que l'on ne connaît pas les valeurs vraies mesurées pour trois des quatre stations en question (les stations n°1, 2 et 3). On compare les rapports calculés entre la station n°0 et chacune des trois autres stations :

- le rapport des surfaces des bassins versants (qui serait utilisé si l'on utilisait une méthode d'extrapolation au prorata des surfaces) ;
- le rapport des lames d'eau estimées à partir de la base de données présentée ci-dessus (qui serait utilisé si l'on utilise une méthode d'extrapolation au prorata des lames d'eau écoulées)
- le rapport des lames d'eau mesurées calculé à partir des données de la banque hydro. On utilisera ce rapport comme élément de validation.

Station	Surface	Rapport de surface par rapport à la station 0	Lame d'eau estimée à partir de la base de données	Rapport des lames d'eau estimées à partir de cette base de données	Lame d'eau mesurée lue dans la banque hydro	Rapport des lames d'eau mesurées lue dans la banque hydro
	ha		m ³ /an		m ³ /an	
0	S0 = 56 793	RS0 = S0/S0 = 1	Qe0 = 144 703 000	RQe0 = Qe0/Qe0 = 1	Qm0 = 136 809 000	RQm0 = Qm0/Qm0 = 1
1	S1 = 5 662	RS1 = S1/S0 = 0,100	Qe2 = 17 913 000	RQe1 = Qe1/Qe0 = 0,124	Qm2 = 16 546 400	RQm1 = Qm1/Qm0 = 0,121
2	S2 = 3 068	RS2 = S2/S0 = 0,054	Qe3 = 7 035 000	RQe2 = Qe2/Qe0 = 0,049	Qm3 = 8 091 000	RQm2 = Qm2/Qm0 = 0,059
3	S3 = 6 644	RS3 = S3/S0 = 0,117	Qe4 = 15 082 000	RQe3 = Qe3/Qe0 = 0,104	Qm4 = 13 056 000	RQm3 = Qm3/Qm0 = 0,095

Tableau 1 : Méthode de calcul de la lame d'eau estimée sur la base du rapport de surface (exemple du bassin versant de la Haute Vilaine, 35)

Station	Lame d'eau mesurée	Erreur absolue en utilisant une méthode au prorata des surfaces en m ³ /an	Erreur relative en %	Erreur absolue en utilisant une méthode au prorata des lames d'eau en m ³ /an	Erreur relative en %
1	16 546 400	2 865 500	17,3	-417 916	-2,5
2	8 091 000	703 314	8,7	1 387 359	17,1
3	13 056 000	-2 950 653	-22,6	-1 172 136	-8,9

Tableau 2 : Comparaison de l'erreur absolue et de l'erreur relative sur l'estimation de la lame d'eau écoulée aux stations n°1, 2 et 3 en réalisant le calcul soit au prorata du rapport des surfaces de bassins versant soit au prorata des lames d'eau estimées à partir d'une base de données régionale sur les modules spécifiques (exemple du bassin versant de la Haute Vilaine, 35)

Le tableau 2 montre que, pour deux stations (n°1 et 3), l'estimation au prorata des lames d'eau écoulées à partir d'une base de données régionale sur les modules spécifiques conduit à une amélioration substantielle de l'estimation avec une baisse significative de l'erreur absolue et de l'erreur relative. Par contre, pour la station n°2, les erreurs absolue et relative sont augmentées.

Dans le cas général, l'extrapolation des débits et des lames d'eau écoulées doit être réalisée préférentiellement au prorata des lames d'eau écoulées à partir d'une base de données régionale sur les modules spécifiques. Mais il conviendrait d'améliorer cette base de données ce qui conduirait à une pertinence supérieure de cette méthode d'extrapolation.

REFERENCE

SOGREAH, 2005. Etudes sur l'évolution des paramètres nitrates dans les eaux brutes des bassins versants Bretagne Eau Pure et des autres bassins versants bretons. Rapport d'étude "Evaluation du programme Bretagne Eau Pure 2000-2006". 24p + annexes

MOYENNES MOBILES

CE QU'IL FAUT RETENIR

- La **moyenne mobile** est destinée à lisser une série chronologique. C'est un outil simple qui permet de mettre en évidence la tendance d'une série en **supprimant la composante saisonnière** et en **atténuant l'amplitude des fluctuations irrégulières**.
- La moyenne mobile permet de mettre en évidence les tendances évolutives sur le long terme en gommant l'impact de la variation annuelle ou saisonnière ou climatique sur un cycle (Aurousseau P.)
- Les moyennes mobiles permettent généralement de **détecter une tendance**.
- On parle aussi de **moyenne lissée** mais cette appellation est à **déconseiller**.

DANS QUELS CAS UTILISER LA MOYENNE MOBILE

Dans les cours d'eau, les concentrations en nitrate sont partiellement corrélées aux variations hydrologiques (débit) : pour les BV à profil normal, les crues sont généralement les périodes durant lesquelles on observe des maxima de concentrations en nitrates et les années humides engendrent des flux d'azote plus importants que les années sèches. Cependant, la relation est loin d'être linéaire.

D'autre part, on observe sur les chroniques de données une évolution cyclique des flux d'azote (Figure 1). Cette cyclicité rend difficile la lecture des tendances long terme de l'évolution des flux d'azote.

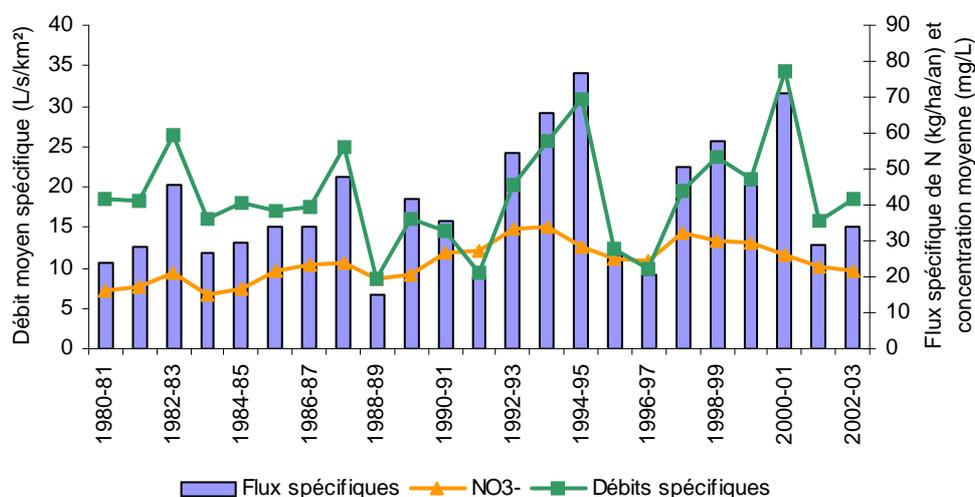


Figure 1 : Flux spécifiques annuels, débits spécifiques annuels et concentration moyenne annuelle par année hydrologique à la station 04 179 500, sur l'Aulne (Aurousseau P. et Vinson J., 2006)

En effet, sur des échelles de temps courtes, l'aspect cyclique des flux d'azote rend difficile l'évaluation de l'évolution des flux. Sur une échelle de temps plus longue, c'est-à-dire supérieure à deux cycles, il est possible d'analyser plus finement l'évolution des flux d'azote grâce à la moyenne mobile. Cette moyenne permet de lisser les variations annuelles, et de mettre en évidence la tendance sur le long terme (à la hausse ou la baisse) des flux d'azote.

Une moyenne lissée sur 7 ans paraît être un bon choix.

- En dessous de 7 ans, les cycles sont encore visibles
- Au dessus de 7 ans, la courbe est de mieux en mieux lissée ; cependant on perd de plus en plus de points de représentation graphique.

De plus, la mise en évidence explicite de cycles ayant une durée de 4 à 6 ans argumente à posteriori l'efficacité de ces calculs de moyenne mobile sur 7 ans (Arousseau P. et Vinson J., 2006).

Toutefois, le choix du pas de temps appliqué au calcul de la moyenne mobile n'est pas fixé et reste à l'appréciation de chacun.

MODE DE CALCUL DE LA MOYENNE MOBILE

La moyenne mobile d'ordre k (pas de temps, ex. 7 ans) consiste à calculer, pour chaque instant d'observation t_i , la moyenne empirique des k observations autour de la date t_i (c'est-à-dire avant et après la date t_i).

Si k est impair et vaut $2m+1$, la moyenne mobile est calculée aux instants d'observations :

$$\bar{x}(t_i) = \frac{X_{i-m} + \dots + X_i + X_{i+m}}{k}$$

avec \bar{x} : la moyenne mobile

m : paramètre définissant le calcul de la moyenne mobile ; nombre de données prises en compte avant la date t_i et après la date t_i .

ILLUSTRATION

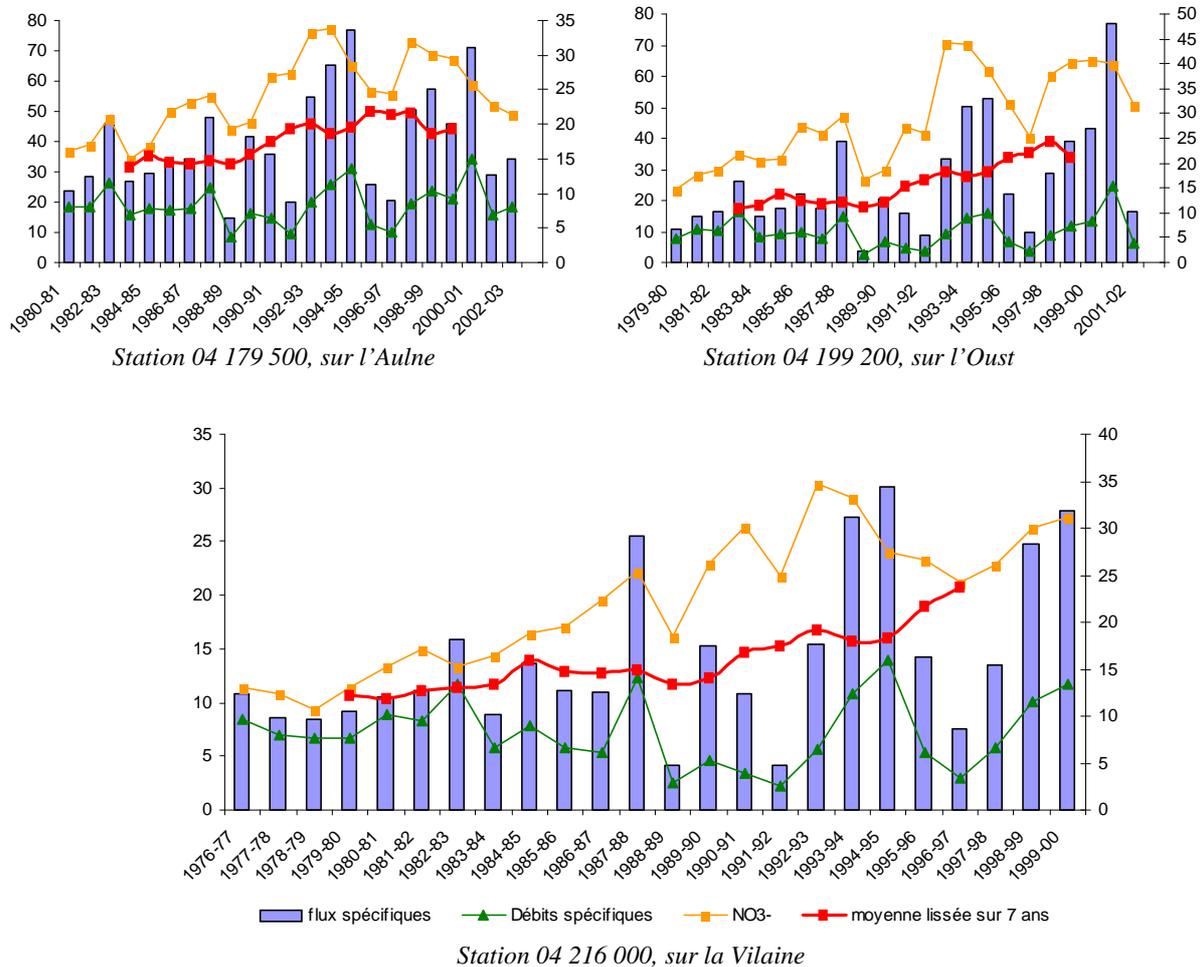


Figure 2 : Flux spécifiques par année hydrologique et moyenne lissée pour les trois stations ayant les séries chronologiques les plus longues
(sur l'axe de gauche : flux spécifiques en kg/ha/an et débits spécifiques en L/s/km² ;
sur l'axe de droite : concentration en NO₃⁻, en mg/L)

REFERENCES

Aurousseau P. et Vinson J., 2006. Mise en évidence de cycles pluriannuels relatifs aux concentrations et aux flux de nitrates dans les bassins versants de Bretagne. Conséquences pour l'interprétation de l'évolution de la qualité des eaux. In "Qualité de l'eau en milieu rural. Savoirs et pratiques dans les bassins versants", coord. Merot Ph., Editions Quae, Update Sciences & Technologies (Monographie), pp 49-60.

Web :

<http://www.math-info.univ-paris5.fr>

[http://www.math-info.univ-paris5.fr/~ycart/mst/mst02/Blandin_Legrand_Vasseliere/\(david\)/def/mob/def.html](http://www.math-info.univ-paris5.fr/~ycart/mst/mst02/Blandin_Legrand_Vasseliere/(david)/def/mob/def.html)

[http://www.math-info.univ-paris5.fr/~ycart/mst/mst02/Blandin_Legrand_Vasseliere/\(david\)/def/mob/def.html](http://www.math-info.univ-paris5.fr/~ycart/mst/mst02/Blandin_Legrand_Vasseliere/(david)/def/mob/def.html)



GLOSSAIRE (FICHES E)

A

ANNEE HYDROLOGIQUE

Période continue de 12 mois pendant laquelle se produit un cycle climatique complet. Elle est choisie de sorte que la variation de l'ensemble du stock d'eau du bassin versant soit minimale pour minimiser les reports d'une année sur l'autre. Le début de l'année hydrologique correspond au début de la reconstitution des stocks d'eau des bassins c'est-à-dire à la reprise des précipitations au début de l'automne dans la région Bretagne. Le début de l'année hydrologique est couramment fixé au 1^{er} octobre dans cette région : le choix de cette date est quelque peu arbitraire, il est justifié par le fait que les premières précipitations automnales significatives ont généralement lieu à partir du début octobre.

B

BASSIN VERSANT

Correspond à la surface qui alimente en eau un point de l'espace appelé exutoire. A un point de l'espace ou exutoire, correspond un bassin versant et son contour. A un bassin et à son contour, correspond un exutoire.

E

ÉCOULEMENT DE BASE

- Partie du débit d'un cours d'eau qui provient essentiellement des nappes souterraines, mais aussi de la vidange des lacs et de la fonte des glaciers, durant des périodes suffisamment longues où il ne se produit ni précipitation, ni fonte des neiges (*Glossaire International d'Hydrologie*, 1992)
- Composante de l'écoulement provenant de la vidange des réserves du bassin, souterraines ou superficielles, qui correspond à des écoulements lents à l'échelle de l'année (*Glossaire d'Hydrologie*).
- Composante de l'écoulement provenant de la vidange des réserves du bassin, souterraines ou superficielles, c'est-à-dire essentiellement du tarissement des nappes. Il représente
 - l'ensemble de l'écoulement qui se produit dans un cours d'eau pendant les périodes sans précipitations, donc en été en régions tempérées.
 - Une partie de l'écoulement pendant le reste de l'année.

EXTRAPOLATION

Action d'introduire des termes non en dedans mais en dehors d'une série (voir aussi [Interpolation](#)).

L'**extrapolation spatiale** consiste à estimer la valeur d'une variable en un point où cette variable n'a pas été mesurée.

H

HYDRAULICITE

L'hydraulicité est le rapport du débit mensuel (ou annuel) à sa moyenne interannuelle. Elle permet de positionner simplement une année par rapport à une année "normale".

I

INTERPOLATION

Opération qui consiste à intercaler, par calcul, des termes entre des suites de nombres (voir aussi [Extrapolation](#)).

S

SOUS BASSIN VERSANT

Correspond à un petit bassin inclus dans un plus grand.

T

TRONÇON DE BASSIN VERSANT

Est la superficie d'un bassin versant dont on a exclu les sous-bassins de l'amont.