

Production, transfert et rétention d'eau et d'azote dans les bassins versants emboîtés de l'Orgeval, affluent du Grand Morin

Nenad Nikolić, Patrick Ansart, Vazken Andréassian, Daniel Zimmer,
Cyril Kao (CEMAGREF, Antony).

Dans le cadre du Thème 1 du PIREN-Seine, le Cemagref (unités de recherche QHAN¹ et DEAN²) travaille au sein du bassin versant de la Seine, sur la compréhension des facteurs qui contrôlent le fonctionnement des petits bassins versants ruraux amont (d'ordre 1 à 3) ainsi que leur connexion avec les bassins aval et la nappe phréatique. En effet, dans le cas de pollutions diffuses d'origine agricole, l'éventuelle adoption de mesures correctives visant à améliorer la qualité des eaux s'effectuera à l'amont, à l'échelle des parcelles agricoles où se produit l'excédent de matières actives qui peut alors être transféré vers les eaux de surface et souterraines. Notre travail se focalise sur les transferts d'eau et de nitrates sur l'ensemble du Bassin Versant de Recherche Expérimental (BVRE) de l'Orgeval (77).

La Figure 1 nous montre l'évolution de la concentration moyenne journalière en nitrates sur le bassin de Mélarchez durant 20 ans. Une nette tendance à l'augmentation est observée, ce qui est préoccupant. L'objectif de notre travail est de comprendre l'origine des variations observées afin de pouvoir expliquer la tendance à long terme.

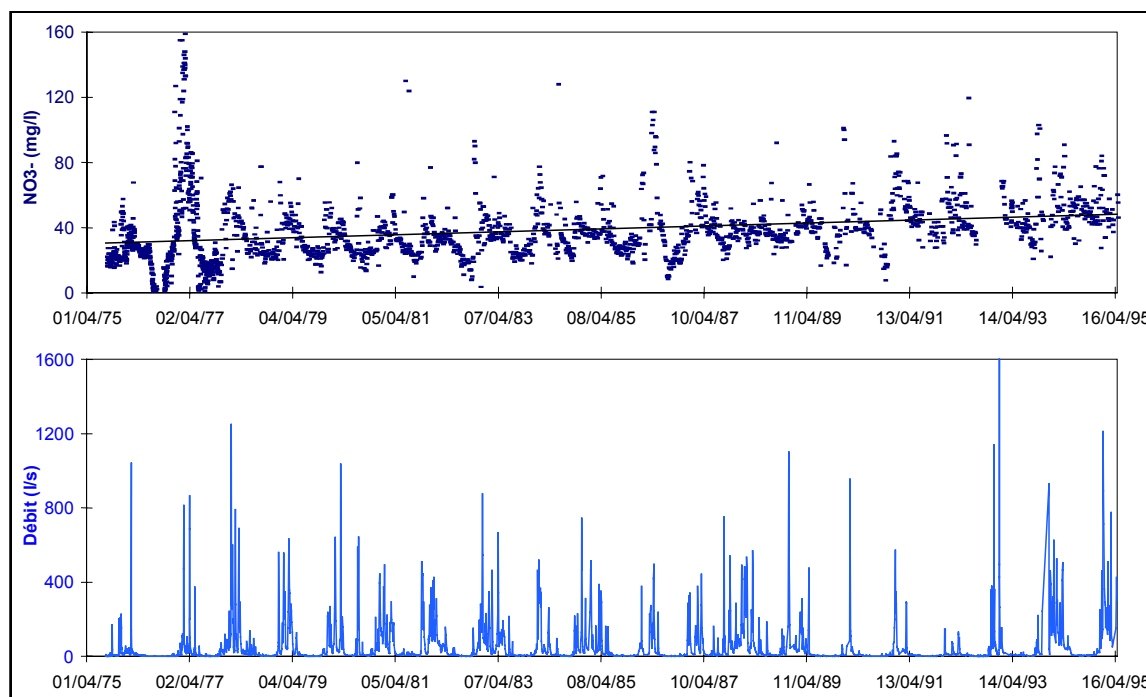


Figure 1 : Evolution de la concentration moyenne journalière en nitrates et du débit moyen journalier sur le bassin de Mélarchez durant 20 ans (1975~1995).

¹ QHAN : Qualité et fonctionnement Hydrologique ANtony.

² DEAN : ouvrages pour le Drainage et l'Etanchéité ANtony.

1. Objectifs du travail

1.1. Présentation du BVRE de l'Orgeval

Le BVRE de l'Orgeval est situé en région parisienne sur le plateau de Brie et est drainé par la rivière Orgeval, un affluent direct du Grand Morin (Fig. **Erreur! Source du renvoi introuvable.**).

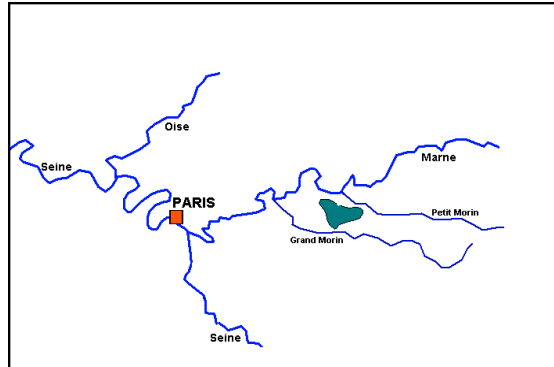


Figure 2 : Localisation géographique du BVRE de l'Orgeval.

L'Orgeval comprend plusieurs sous-bassins étudiés actuellement (Figure 3) : Goins (1,3 km² : ordre 1) est un bassin drainé à 80 % par des tuyaux enterrés et constitué presque uniquement de parcelles agricoles, Choqueuse (1,7 km² : ordre 1) comprend le sous-bassin de Goins plus un complément entièrement forestier non drainé de 0,4 km², Quatre Cents (1,1 km² : ordre 1) est un bassin entièrement forestier et non drainé, et Mèlarchez (7,1 km² : ordre 2) est un bassin entièrement agricole et fortement drainé (> 90 %). Ces bassins sont emboîtés dans le bassin des Avenelles (45,7 km² : ordre 3), lui même inclus dans le bassin de l'Orgeval au Theil (104 km² : ordre 3).

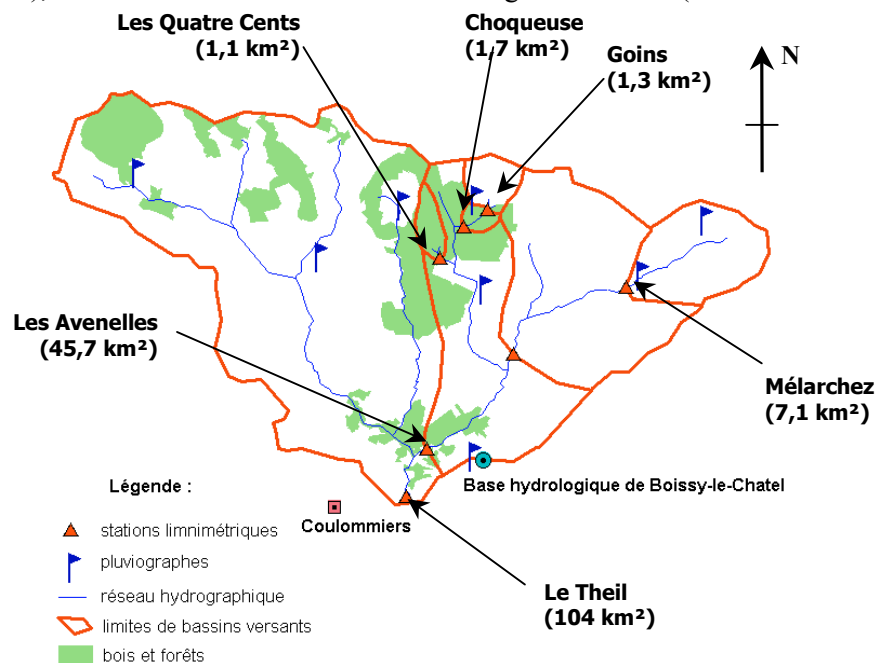


Figure 3 : Carte du Bassin Versant de Recherche Expérimental de l'Orgeval.

1.2. Matériel et méthodes

Dans le cadre du programme PIREN-Seine, les stations de Goins et Choqueuse ont été équipées fin 1998 d'un seuil avec déversoir en V à angle de 90°, fixé par un ancrage profond en béton. Un limnigraphe, relié à un flotteur situé dans un puits de tranquillisation, enregistre les hauteurs d'eau

toutes les 15 minutes. Chaque station est équipée d'une passerelle pour pouvoir effectuer des jaugeages manuels (permettant l'ajustement des courbes de tarage) et d'un préleveur automatique d'échantillons d'eau, équipé de 24 flacons. Le préleveur est programmé de manière à effectuer au moins un prélèvement quotidien en toutes circonstances, ainsi qu'un prélèvement au volume passé. Cette dernière caractéristique permet d'avoir un bon suivi des crues, tout en ne s'embarrassant pas de mesures nombreuses et inutiles en période d'étiage. La station du bassin des Quatre Cents (contrôle entièrement forestier de 1,1 km²) a été mise en service pendant l'hiver 2000, elle fait l'objet d'un suivi complet à l'instar de Goins et Choqueuse. Elle sert de référence pour les apports forestiers durant l'année de suivi 1999~2000. En revanche, les prélèvements d'échantillons d'eau à Mélarchez ne se font pas avec asservissement au débit comme précédemment, les prélèvements asservis au temps ont lieu toutes les quatre heures sur des périodes de prélèvements durant trois jours : tous les échantillons ainsi prélevés sont ensuite mélangés pour obtenir un échantillon moyen (une concentration moyenne) représentatif des trois jours de prélèvements. Les périodes étudiées ici correspondent à la totalité des campagnes de prélèvements 1998~1999 et 1999~2000.

1.3.Résultats de la campagne d'étude 1998~1999

Pour ce travail, nous avons retenu trois principaux objectifs :

1. quantifier le fonctionnement hydrologique des sous-bassins à différentes échelles de temps, notamment dans le but de mieux comprendre la variabilité spatiale (passage entre l'amont et l'aval) et temporelle (saisonalité hydrologique marquée par le régime hydrique des sols) au sein de l'Orgeval : déterminer la part des écoulements de surface/subsurface et souterrains afin de mieux cerner l'origine de l'eau qui s'écoule à l'exutoire du bassin ;
2. préciser les concentrations et les flux d'azote pour les différents sous-bassins sur la même échelle temporelle et faire la liaison avec les flux d'eau afin d'interpréter les flux de polluants et de déterminer l'origine des nitrates ainsi que leur mode de transfert de l'amont à l'aval ;
3. étudier les interactions entre la partie agricole et la partie forestière du bassin versant de Choqueuse : déterminer le rôle des interfaces riveraines et vérifier si cette zone possède un rôle potentiel effectif d'abattement des pollutions, si oui : à quelle échelle et selon quels mécanismes ?

Ainsi, le fonctionnement hydrologique des sous-bassins à différentes échelles spatiales et temporelles a été quantifié. Le BVRE de l'Orgeval se présente comme un ensemble de bassins versants emboîtés caractérisés par des systèmes hydrologique et hydrogéologique complexes : les divers bassins n'interagissent pas de la même manière entre eux et avec la nappe phréatique selon leur position (amont ou aval). L'Orgeval peut être ainsi divisé en deux parties :

1. un secteur amont où l'influence de la nappe profonde est inexistante (absence de débit de base pendant la saison sèche : seule la formation de nappes temporaires en saison hivernale produit les écoulements observés) et où les apports latéraux sont pratiquement nuls : sols présentant un horizon imperméable (avec localement d'éventuelles infiltrations profondes) et un fonctionnement hydrologique marqué par une forte saisonnalité (bassins versants d'ordre 1 et 2 : Mélarchez³, Choqueuse, Goins et Quatre Cents) ;
2. un secteur où les interactions avec la nappe profonde ne sont pas négligeables et où les saisonnalité et variabilité événementielles sont atténuées (bassins d'ordre 3 : partie aval de l'Orgeval). Les Avenelles et le Theil présentent un ensemble de mécanismes identiques au cours duquel ils restituent de façon régulière l'eau infiltrée à l'amont, ce qui montre que des échanges se produisent entre la surface/subsurface et la profondeur. La prédominance de ce type de fonctionnement hydrologique, par rapport aux autres sur l'ensemble du BVRE, pourrait par exemple aider à vérifier si le choix d'apports en nitrates à concentrations constantes fait dans le modèle Sénèque se justifie.

³ Mélarchez est en position plutôt intermédiaire avec une nappe pédogologique presque permanente et de probables apports latéraux.

Au cours du suivi des bassins amont (Goins, Choqueuse et Mèlarchez), les résultats d'analyse des flux d'azote nitrique nous ont permis de faire la liaison entre les flux d'eau et de polluants afin de comprendre l'origine et le devenir de la pollution nitrique. Nous savons dans le cas de l'azote que ce sont le reliquat lessivable en entrée d'hiver (Arlot, 1999) et l'apport d'engrais azotés en sortie d'hiver qui, dans le contexte des bassins versants hydromorphes drainés tel les bassins versants amonts de l'Orgeval, sont les initiateurs de la pollution. Or, c'est justement pendant ces périodes (entrée et sortie d'hiver) que ces bassins d'ordres 1 et 2 sont en crue. De plus, depuis quelques années des crues de printemps ont régulièrement lieu après la fin de l'hiver hydrologique (pour exemple les crues du 14 avril 1999 : voir rapport d'activité 1999). Ainsi, dans le système Orgeval, les sous-bassins amont (Goins et Mèlarchez) sont largement contributifs à la pollution. Nous savons que le nitrate lessivé en hiver au niveau de ces sous-bassins ne fait pas partie d'un stock limitant. En outre, des échanges entre les nappes superficielles de Mèlarchez et la nappe profonde seraient possibles, de même que ce bassin pourrait recevoir des apports latéraux. Selon la dynamique hydrologique des nappes profondes, les polluants peuvent refaire surface à l'exutoire du BVRE après un temps de latence assez long (probablement supérieur à l'année). En ce qui concerne la zone entièrement forestière et hydromorphe du bassin de Choqueuse, elle ne semble pas abattre de façon significative la charge polluante. Elle contribue même au flux d'azote nitrique qui la traverse, flux provenant du sous-bassin de Goins lors d'épisodes de crues par exemple. Cela serait dû pour grande partie à la recalibration du rôle de Choqueuse : trop profond n'a pas permis ces dernières années le débordement de l'eau lors de crues.

1.4.Objectifs de l'année en cours

Pour la suite de ce travail (campagne d'étude 1999~2000), deux objectifs ont été retenus :

1. améliorer notre compréhension du fonctionnement hydrologique du BVRE de l'Orgeval : déterminer les parts respectives d'écoulements de surface/subsurface et profonds afin d'analyser les modalités des changements d'échelle spatiale (ordre 1 à 3) et de combiner ces résultats à une analyse des concentrations nitriques issues des bassins amont pour diverses échelles temporelles (de l'épisode pluvieux à l'année hydrologique) ;
2. valider les résultats observés durant la première année d'étude sur le rôle des zones forestières dans les sous-bassins amont vis-à-vis de la pollution azotée, à l'échelle du bilan annuel, et affiner l'analyse sur certains événements pluvieux majeurs. Puis étudier la contribution des zones dites " naturelles " aux flux des sous-bassins amont dans le BVRE de l'Orgeval.

Toutes ces analyses devraient permettre de passer des petites aux grandes échelles et de valider, puis affiner, la compréhension des grands processus de lessivage de l'azote dans le bassin versant de la Seine.

2. Résultats et discussions

2.1.Fonctionnement hydrologique des bassins emboîtés du BVRE de l'Orgeval

L'analyse des bilans hydrologiques à différents pas de temps nous aide à déterminer dans quelles proportions s'effectue le partage des écoulements entre la surface/subsurface et la profondeur. L'échelle spatiale est définie par le type de bassin sur lequel est effectué le bilan, les échelles de temps retenues dans ce travail sont au nombre de trois : la totalité de l'année hydrologique (centrée sur l'hiver hydrologique), l'hiver hydrologique et l'évènement pluvieux (période de pluies intenses). Les bassins du Theil et des Avenelles (ordre 3) débitent en permanence. Goins, Choqueuse et Quatre Cents (ordre 1) ont un fonctionnement beaucoup plus intermittent tout au long de l'année et même au sein de l'hiver hydrologique. Mèlarchez (ordre 2) occupe une position intermédiaire.

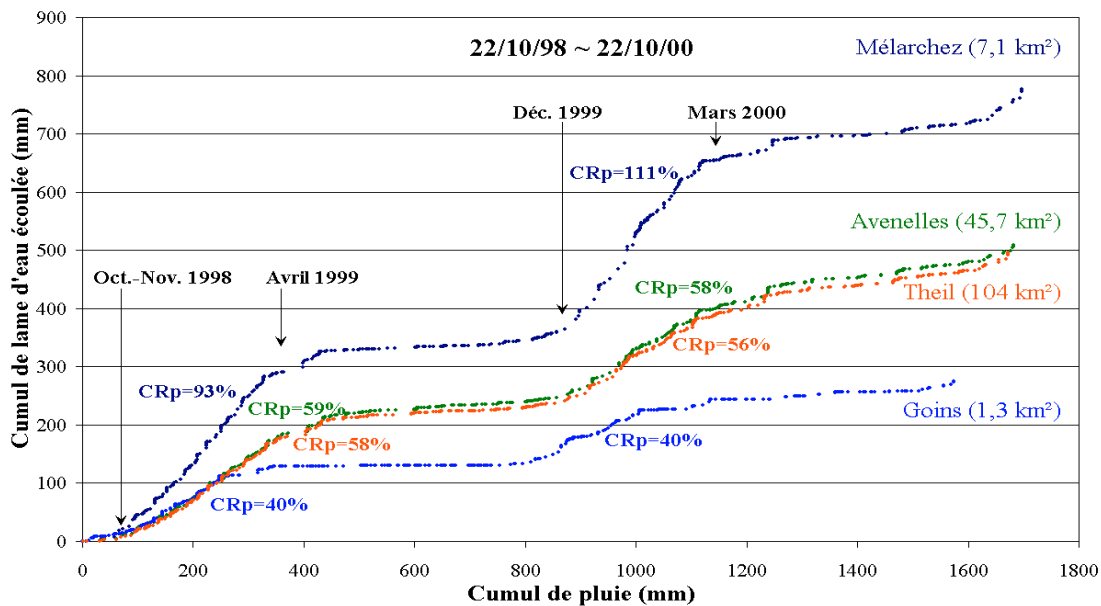
2.1.1.Bilans hydriques de surface

Pour chaque bassin versant des coefficients de restitution de la pluie brute (CRp) peuvent être calculés pour l'année hydrologique ou pour l'hiver hydrologique (Arlot, 1999). Dans ce dernier cas, ces coefficients correspondent aux pentes des courbes de doubles-cumuls " pluie – débit " :

$$CRp \text{ brut} = D / P$$

avec D (lame d'eau drainée à l'exutoire du bassin versant considéré) et P (précipitations).

Lors de la précédente campagne d'étude, nous avons vu que le fonctionnement hydrologique des bassins versants à nappes superficielles passe par 3 phases distinctes : la saison automnale de recharge des réserves du sol caractérisée par des écoulements sporadiques, l'hiver hydrologique ou Saison de Drainage Intense (SDI : Lesaffre, 1988) qui correspond à une restitution permanente et entretenue de l'excès d'eau arrivant au sol, et la saison de disparition des nappes superficielles. L'hiver hydrologique est la période de l'année pendant laquelle la lame d'eau drainée est maximale. Pour déterminer les dates de début et de fin de ces 3 phases, une méthode empirique adaptée aux systèmes à nappes superficielles a été mise au point par Lesaffre (1988) : tracer le graphique des doubles-cumuls de pluie et de débits et tenter de délimiter des périodes diverses selon la pente de la courbe. La figure **Erreur! Source du renvoi introuvable.** représente ces doubles cumuls pour 4 bassins durant les 2



campagnes de suivi 98~99 et 99~00.

Figure 4. Doubles-cumuls " pluie – débit " pour quatre bassins (ordre 1 à 3) durant les deux campagnes d'étude.

Afin de faciliter l'étude et la comparaison des résultats pour les différents bassins, nous avons choisi de travailler sur un " hiver hydrologique commun " (période englobant les hivers hydrologiques de chaque bassin). Pendant cette période de l'année où la lame d'eau drainée est maximale, la quantité d'eau potentiellement évaporée n'est pas toujours négligeable et la prise en compte de l'ETP dans le calcul du coefficient de restitution de la pluie peut s'avérer utile pour l'étude du partage des écoulements entre la surface/subsurface et la profondeur. Cette prise en compte conduit au calcul du coefficient de restitution de la pluie nette (Tableau 1) :

$$CRp \text{ net} = D / (P - ETP)$$

avec ETP (évapotranspiration potentielle).

Tableau 1. Coefficients de restitution bruts (et nets pendant les hivers hydrologiques) calculés pour chaque bassin pendant les 2 campagnes de suivi de la qualité.

Bassins étudiés	Campagne d'étude 1998~1999 (22/10/98 – 21/10/99)		Hiver hydrologique 1998~1999 (31/10/98 – 13/04/99)	
	CRp brut		CRp brut	CRp net
<i>Theil</i>	30 %		58 %	116 %
<i>Avenelles</i>	31 %		59 %	117 %
<i>Mélarchez</i>	45 %		93 %	185 %
<i>Choqueuse</i>	19 %		36 %	73 %
<i>Goins</i>	20 %		40 %	82 %
Bassins étudiés	Campagne d'étude 1999~2000 (22/10/99 – 21/10/00)		Hiver hydrologique 1999~2000 (11/12/99 – 25/03/00)	
	CRp brut		CRp brut	CRp net
<i>Theil</i>	29 %		53 %	77 %
<i>Avenelles</i>	29 %		55 %	79 %
<i>Mélarchez</i>	47 %		109 %	158 %
<i>Choqueuse</i>	17 %		35 %	51 %
<i>Goins</i>	16 %		35 %	50 %
<i>Quatre Cents</i> *	8 %		15 %	33 %

* : pour les Quatre Cents, les données ne sont disponibles que depuis le 28/01/00.

Les CRp plus élevés pendant l'hiver hydrologique reflètent le fait que le maximum de l'eau de pluie est restituée durant cette période de l'année hydrologique. Pour les bassins amont, il y a 2 comportements très distincts : Mélarchez se démarque de Goins et Choqueuse en ayant des CRp 2 à 3 fois plus élevés. Le bassin entièrement forestier des Quatre Cents semble retenir plus d'eau que Goins et Choqueuse (CRp plus petit) : bien que nous n'ayons pas de données pour les trois 1^{ers} mois, on peut s'attendre au fait que la forêt stocke plus d'eau (interception et réserves du sol potentiellement plus vides). A l'aval, les 2 bassins d'ordre 3 (Avenelles et Theil) se comportent de façon identique en occupant une position intermédiaire.

2.1.2. Ecoulements de surface

La quantification des écoulements de surface sur différentes périodes est présentée en annexes 1 et 2. Les périodes sont la totalité de la campagne d'étude, l'hiver hydrologique (ou SDI), les premières et dernières crues de la SDI et, les crues printanières. Ce choix vise à mettre en évidence la périodicité des écoulements de surface (ou dynamique hydrologique) y compris pour les bassins les moins intermittents (ordre 2 à 3). Suivant l'année étudiée, les crues de la SDI peuvent représenter entre la ½ et les ¾ de l'eau totale écoulee pendant l'année. Deux événements pluvieux majeures conduisant à des périodes de crues ont été analysés : le 1^{er} coïncide avec le début de la SDI (après recharge des réserves du sol) et le 2^{ème} marque la fin de la SDI.

Les comportements hydrologiques de certains bassins sont relativement similaires (annexe 1) : le Theil et les Avenelles forment un premier groupe représentatif du comportement moyen de l'ensemble du BVRE de l'Orgeval, Goins et Choqueuse en forment un deuxième où la quantité d'eau exportée est moindre, Mélarchez quant à lui en exporte plus qu'aucun autre bassin, et le bassin des Quatre Cents est celui qui en exporte le moins. Ces spécificités fonctionnelles se répètent la deuxième année (annexe 2), on peut donc considérer qu'il s'agit là du mode de fonctionnement hydrologique de chaque bassin. D'ailleurs, la comparaison des coefficients de restitution (Fig. **Erreur! Source du renvoi introuvable.**) nous permet de retrouver globalement la tendance affichée précédemment. Ces différents fonctionnements s'expliquent par la position de chaque bassin dans le BVRE de l'Orgeval (contexte pédologique, interaction ou non avec l'aquifère profond, interactions des bassins entre eux) et par l'ampleur des interventions humaines (présence ou non de réseaux de drainage agricole). Par ailleurs, les mêmes valeurs de CRp trouvées pour les Avenelles et le Theil (Tableau 1) montrent qu'ils regroupent un ensemble de mécanismes identiques dans lequel on peut supposer que l'eau tombée au sol ne reste pas forcément captée par le réseau hydrographique de surface. Ces bassins restituent de

façon régulière l'eau infiltrée à l'amont, ce qui montre que des échanges se produisent entre la surface/subsurface et la profondeur. Ceci s'illustre au Theil et aux Avenelles par la présence d'un débit de base constant au cours de l'année : 0,045 mm/j pour le Theil (soit 4680 m³/j) et 0,075 mm/j pour les Avenelles (soit 3428 m³/j). En outre, Mélarchez pourrait recevoir des apports d'eau issus de l'aquifère ou même des apports latéraux (CRp brut ≥ 100 %), cela est d'autant plus flagrant en prenant en compte l'ETP (CRp net) ou en comparant la proportion d'eau de pluie écoulée dans ce bassin par rapport aux autres (Fig. **Erreur! Source du renvoi introuvable.**). Enfin, le taux de restitution du bassin des Quatre Cents est le plus faible (Tableau 1), cela est dû à la forte rétention de l'eau de pluie par la zone forestière, ce qui induit un décalage réactionnel par rapports aux autres (l'hiver hydrologique commence deux mois plus tard : 06/02/00 ~ 06/05/00) : la recharge en eau du sol est plus longue.

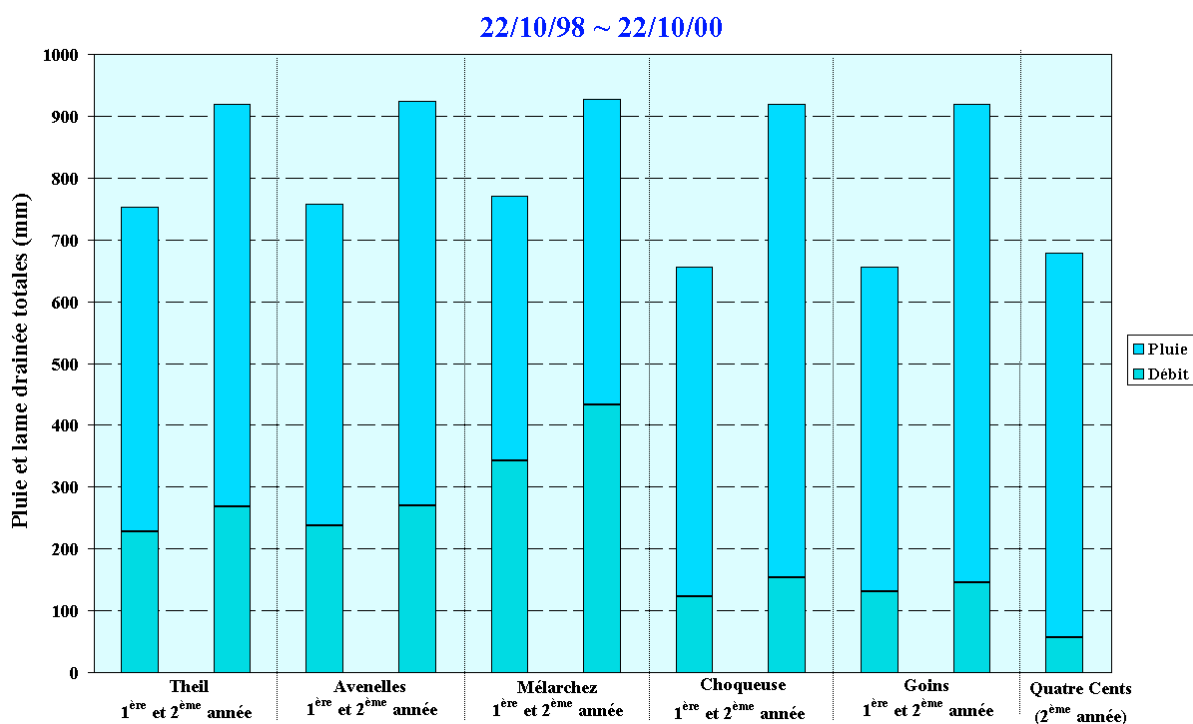


Figure 5. Pluie et de lame d'eau drainée pour chaque bassin sur les deux années d'étude.

Les proportions d'eau exportées par chaque bassin durant les différentes périodes de crues répertoriées (annexes 1 et 2) nous renseignent sur la dynamique hydrologique de chaque bassin. En effet, plus un bassin adopte un fonctionnement intermittent au cours de l'année et plus ses proportions sont élevées par rapport à celles des autres bassins (l'essentiel de l'écoulement s'effectue pendant l'hiver hydrologique). L'influence nulle de la nappe profonde conduit à une absence de débit de base pendant la saison sèche : seul la formation de nappes superficielles en saison hivernale produit les écoulements observés. Par contre, si les petits bassins amont ne reçoivent pas d'eau de la nappe phréatique, il est possible qu'ils en perdent par infiltrations profondes, mais les données à notre disposition ne nous permettent pas de l'affirmer : ces pertes sont de l'ordre de l'erreur commise sur la mesure des débits. En revanche à Mélarchez, des apports extérieurs expliqueraient que les valeurs de CRp soient plus élevées qu'à Goins (pourtant drainé à 80 %). La combinaison d'éventuelles infiltrations profondes avec la formation de nappes perchées expliquerait ainsi les intermittences observées sur les 3 bassins amont.

2.2. Qualité des eaux des bassins amont du BVRE de l'Orgeval

Nous décrivons la dynamique d'exportation des 4 bassins amont (Choqueuse, Goins, Quatre Cents et Mélarchez), les bassins du Theil et des Avenelles ne possédant pas de préleveurs. Les mécanismes propres aux bassins de plateau sont explicités et les différents bassins sont comparés les uns aux autres (caractéristiques spatio-temporelles), la relation est faite avec leur fonctionnement

hydrologique. Cela permet, avec l'établissement des bilans d'azote, de comprendre les mécanismes mis en jeu afin d'expliquer le fonctionnement du système Orgeval : déterminer l'origine des polluants à l'exutoire du BVRE (au Theil) et analyser l'impact de systèmes drainants sur la qualité de l'eau pour une éventuelle intervention palliative. Les annexes 3 et 4 résument les dynamiques d'exportation des nitrates pour chaque bassin sur différentes périodes, il s'agit dans la mesure du possible des mêmes que celles utilisées pour les bilans hydriques afin de pouvoir relier les résultats obtenus aux caractéristiques hydrologiques des sous-bassins étudiés, et aux pratiques culturales.

2.2.1. Qualité des eaux des bassins amont

Nous étudions des bassins versants à nappes superficielles drainées. Par conséquent, en saison hivernale dominant des mécanismes de transfert des polluants uniquement liés à l'hydraulique de surface (drains, émissaires collecteurs, ruissellement) ou de subsurface (lessivage vers les nappes perchées), autrement dit des transferts relativement rapides par rapport au reste de l'année, mais les apports profonds ne sont pas négligeables pour autant. En terme de quantités exportées, cela se traduit pour les 4 bassins (Mélarchez, Choqueuse, Goins et Quatre Cents) par un maximum pendant l'hiver hydrologique (annexes 3 et 4 : ≥ 63 % du total). Il est intéressant de constater que Mélarchez exporte plus de nitrates (kg/ha) que Goins, Choqueuse et les Quatre Cents réunis. Cette tendance s'inverse durant les dernières crues hivernales et les crues printanières (kg/ha & %). Les causes multiples sont la reprise de la minéralisation et de l'activité biologique, et surtout les apports exogènes anthropiques qui provoquent une augmentation des teneurs moyennes en NO_3^- dans les eaux des petits bassins amont (augmentation plus importante à Goins qu'à Choqueuse). De plus, l'intermittence plus importante de ces bassins contribue à concentrer davantage les nitrates sur des épisodes d'écoulements majeures, alors qu'à Mélarchez les écoulements sont plus entretenus (fonctionnement moins intermittent : influence de l'aquifère). La figure **Erreur! Source du renvoi introuvable.** indique que la dynamique d'exportation des NO_3^- suit la dynamique hydrologique et souligne le fait que la majeure partie de l'azote a été lessivé durant les 1^{ères} crues hivernales car, il pourrait y avoir à Mélarchez une contribution non négligeable de l'aquifère au flux de nitrates en surface/subsurface durant le début de l'hiver hydrologique.

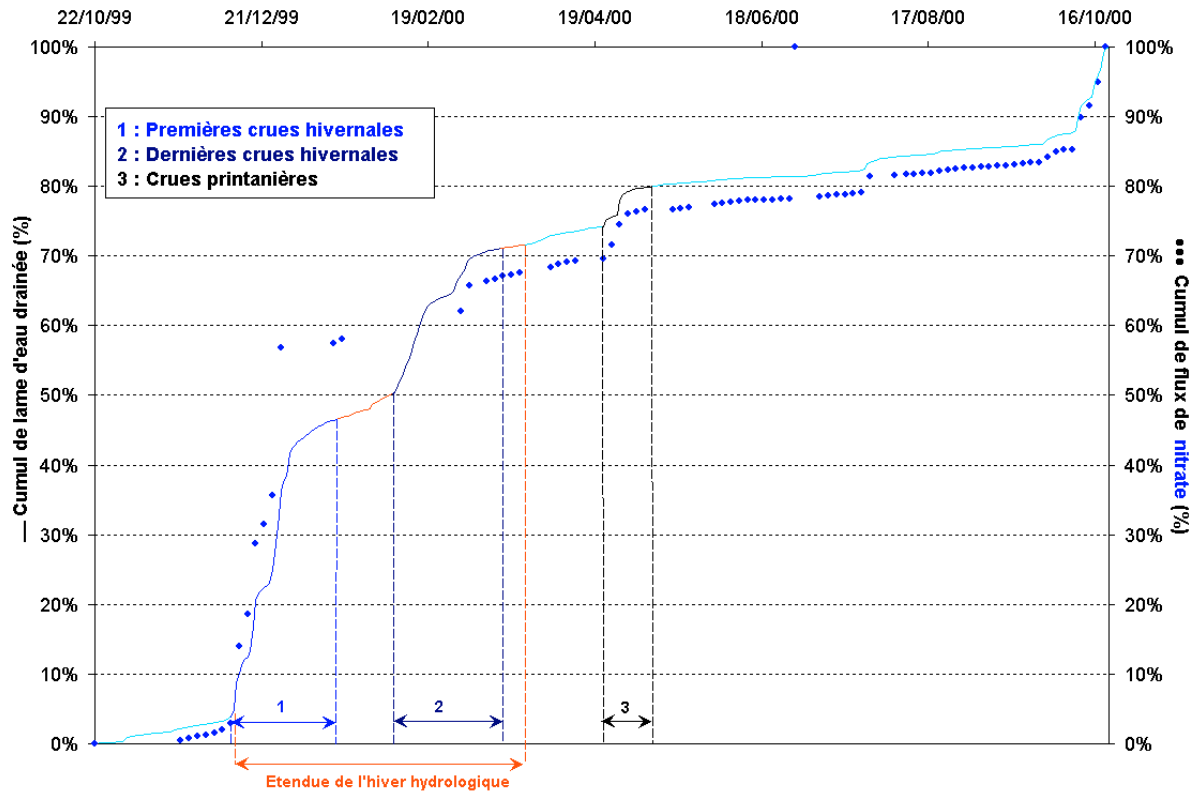


Figure 6. Cumuls relatifs, de la lame d'eau écoulée et du flux d'azote nitrique, par rapport au total sur la campagne d'étude 1999~2000 pour le bassin de Mèlarchez.

Contrairement à la figure **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, la figure 7 illustre l'augmentation du flux nitrique (dû à l'élévation des teneurs moyennes en NO_3^-) qui a lieu durant les dernières crues hivernales et les crues printanières au bassin de Choqueuse. A l'inverse, le flux de chlore (utilisé comme traceur naturel) suit l'évolution du flux hydrique. Les plateaux présents après les 11 mars et 1^{er} mai reflètent une quasi absence des écoulements (fonctionnement intermittent).

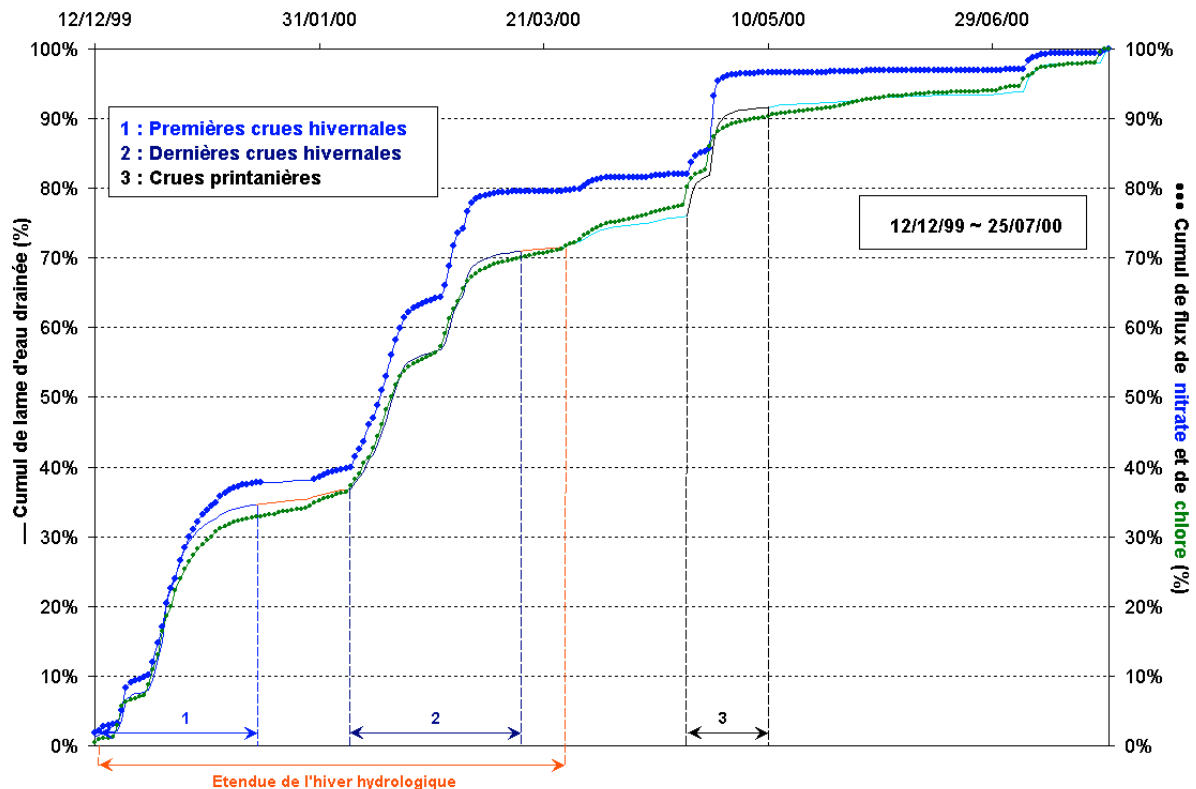


Figure 7. Cumuls relatifs, de la lame d'eau écoulee et du flux de nitrates et de chlore, par rapport au total durant la période 12/12/99 ~ 25/07/00 (pour le bassin de Choqueuse).

Pendant les crues (hivernales ou printanières), les deux principaux comportements de lessivage observés sont des comportements dits d' "entraînement" et des comportements dits de "dilution" (Arlot, 1999). Ils ont pu être interprétés et surtout démontrés comme résultant de la localisation du soluté dans le sol au moment de la crue :

1. l'entraînement (Fig. 8) se manifeste par un pic de concentration nitrique initié par un pic de crue. Il se produit lorsque le soluté se situe à la surface du sol ou dans les tous premiers horizons, par exemple lorsqu'il a été apporté par amendements agricoles (fin de l'hiver - début du printemps : crues printanières). L'essentiel des nitrates ayant été lessivé en début d'hiver, la pluie tombée au sol concentre et entraîne les nitrates exogènes apportés à la surface du sol ;
2. la dilution (Fig. 8) se manifeste par une chute de la concentration nitrique provoqué par le pic de crue. Ce mécanisme se produit lorsque le soluté réside dans le profil de sol, par exemple lorsqu'il constitue le reliquat en entrée d'hiver (début de l'hiver : premières crues hivernales). L'eau de subsurface résidant dans le profil de sol et qui constitue la nappe perchée acquiert, lors de sa constitution, une certaine concentration en nitrates. Lorsque l'eau de pluie moins chargée passe à travers le sol, elle dilue l'eau des nappes tout en provoquant le lessivage des nitrates.

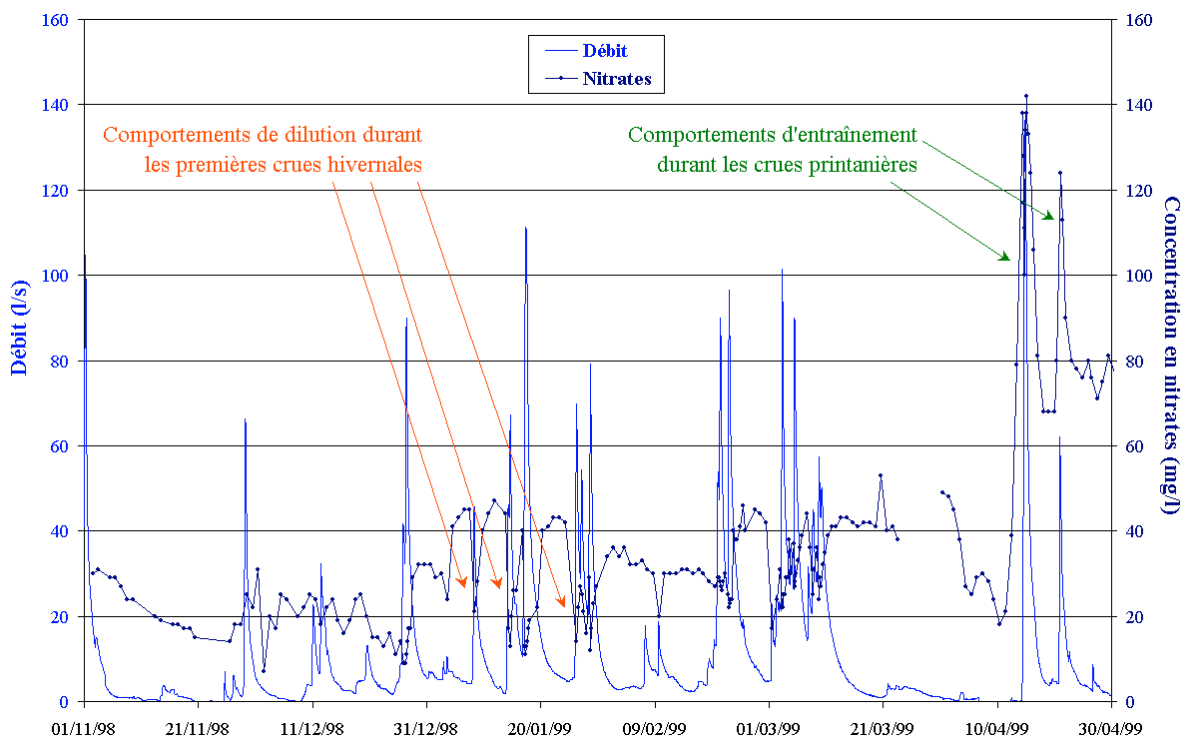


Figure 8. Evolution de la concentration en nitrates en fonction du débit à Goins illustrant les comportements de dilution et d'entraînement lors de lessivages.

La différence " Choqueuse – Goins " (annexe 3) reflète la contribution de la zone forestière au flux de nitrates issu du bassin de Choqueuse. Cette différence est très faible, par conséquent il est admis que la dynamique de lessivage du bassin de Choqueuse est surtout conditionnée par Goins, le sous-bassin agricole situé en son amont. Par conséquent, la zone forestière du bassin de Choqueuse n'abat pas significativement la charge polluante. Le bassin de Goins est, au même titre que Mélarchez, très largement contributif à la pollution du BVRE de l'Orgeval car lors des crues printanières, après les amendements agricoles, une grande partie de la quantité de matières actives est captée par le réseau de drainage et est transférée vers Choqueuse via le rû qui relie les deux sous-bassins.

2.2.2. Contribution des zones dites " naturelles " aux flux globaux du BVRE de l'Orgeval

Afin de pouvoir comprendre les causes exactes de l'absence régulière d'atténuation des charges polluantes, le bassin des Quatre Cents a été équipé à son tour de tout le matériel nécessaire au suivi de la qualité des eaux qui le traversent et à la mesure des débits. Le fait qu'il soit entièrement forestier nous a amené à le considérer comme un témoin du fonctionnement d'un couvert forestier à l'amont du BVRE de l'Orgeval.

La tempête du 26 décembre 1999 a occasionné des dégâts considérables en forêt, rendant l'accès aux stations très difficile. Par chance elle n'a détruit qu'un préleveur, par contre elle a occasionné un retard pour ce qui concerne la mise en fonction de la station du bassin des Quatre Cents : mesures débit-métrique et de qualité des eaux mises en service respectivement fin janvier 2000 et début mars. Dans la zone forestière de Choqueuse, beaucoup de branches et d'arbres sont tombés dans le fossé ce qui a provoqué un embâcle à l'aval de la station limnimétrique de Goins. Les débits ont alors été sous-estimés, de même que le flux de nitrates pendant 2 ou 3 mois. Ces données faussées sont à l'origine de la différence de résultats observés entre la première et la deuxième année de suivi (annexes 3 et 4) : nous avons alors l'impression que la forêt de Choqueuse rejette plus de nitrates lors de la 2^{ème} année d'étude. Si l'on se place pour les calculs après nettoyage de l'embâcle, on retourne à des valeurs raisonnables, comparables (en ordre de grandeur) à la production du bassin forestier (Tableau 2). En effet, les données ne se retrouvent erronées que lorsque les débits sont assez forts pour permettre une influence aval. Durant la période citée précédemment, les débits sont moins élevés : les données sont par conséquent plus justes en moyenne.

Tableau 2. Quantités de nitrates exportées par les 3 bassins amont (11/03/00 ~ 22/10/00).

Bassins	Flux (kg/ha)	Surface (ha)	Quantité NO ₃ ⁻ (kg)	Comparaison “ Choq. – Goins ” avec Quatre Cents (kg _{NO₃})
Choqueuse	12,487	170	2123	260 *
Goins	14,331	130	1863	(* = Choqueuse – Goins)
Quatre Cents	1,864	110	205	205

Pour les crues printanières, les calculs semblent indiquer (Tableau 3) un abattement des charges ($\approx 10\%$) du flux entrant.

TABLEAU 3. Flux spécifiques de nitrates pour les quatre bassins étudiés et différence de flux entre la sortie et l'entrée en forêt de Choqueuse (“ Choq. – Goins ”) pour les crues printanières 2000.

Bassins Étudiés	Crues printanières (22/04/00~10/05/00)	
	Flux NO ₃ ⁻ (kg/ha)	Flux (% sur l'année 1999-2000)
Mélarchez	10	10 %
Choqueuse	6	15 %
Goins	9	23 %
Quatre Cents	1	68 %
Choq. – Goins	-3	-7 %

Les analyses de la qualité des eaux de ces bassins amont nous ont permis de déterminer la dynamique de lessivage des nitrates. La figure 9 nous montre l'exemple du bassin de Choqueuse où le lessivage du Chlore est régulier tandis que les nitrates semblent sans cesse alimentés par des apports anthropiques (amendements agricoles), d'où l'observation d'augmentations du flux cumulé de NO₃⁻ après les crues printanières du 14/04/99. Les concentrations de flux de NO₃⁻ et de Cl⁻ pour ces 2 années d'étude figurent à côté des courbes : elles traduisent la sensibilité du sol par rapport au lessivage de l'élément considéré.

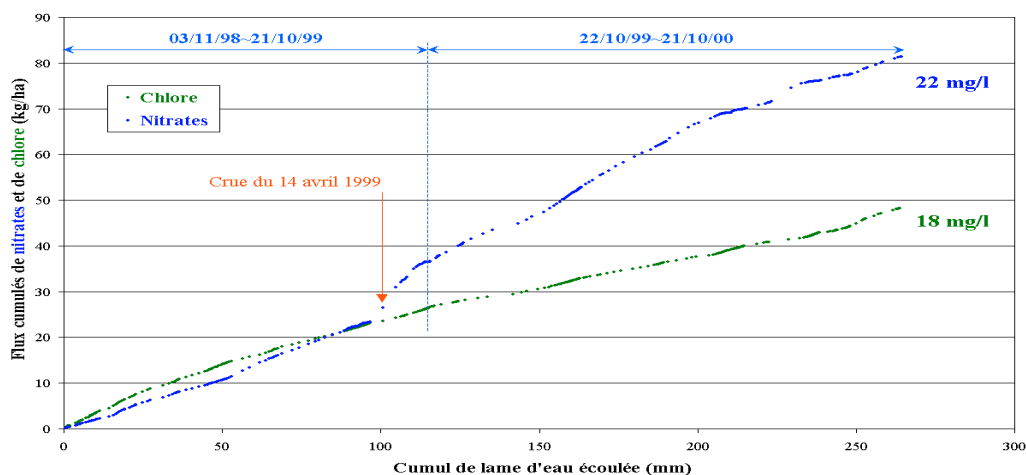


Figure 9. cumuls des flux de nitrates et chlore en fonction du cumul de lame d'eau écoulée au bassin de Choqueuse du 11/03/98 au 22/10/00.

3. Conclusion et perspectives

Nous pouvons représenter le système Orgeval comme un ensemble de compartiments emboîtés qui interagissent entre eux et avec le système aquifère profond. Nous avons quantifié le fonctionnement hydrologique des sous-bassins à différentes échelles spatiale et temporelle. Le régime hydrique des sols, dû au faciès pédologique, est caractérisé par d'éventuelles infiltrations profondes, par l'évolution des nappes de surface et par l'existence d'apports profonds pour les bassins aval. Ces phénomènes se combinent et induisent des comportements hydrologiques spécifiques à chaque bassin :

intermittence des écoulements pour les bassins amont, régularité des écoulements à l'aval (apports d'eau issus de la nappe profonde).

Les résultats d'analyse des flux d'azote nitrique permettent de faire la liaison entre les flux d'eau et de polluants, ceci afin de comprendre l'origine et le devenir de la pollution nitrique. Dans le système Orgeval, les sous-bassins amonts d'ordre 1 (Goins et Choqueuse) et d'ordre 2 (Mélarchez) sont largement contributifs à la pollution, surtout Mélarchez qui possède une capacité de restitution de l'eau supérieure. Les nitrates lessivés au niveau de ces sous-bassins ne feraient pas partie d'un stock limitant, au contraire de la nitrification se produit au printemps ainsi que des apports par amendements agricoles. Aujourd'hui, la détermination des parts respectives d'écoulements de surface/subsurface et profonds est encore approximative. Ainsi, les infiltrations profondes à Mélarchez n'ont pu être mises en évidence, quant à celles de Goins elles sont sûrement, à en juger par les bilans hydriques, de l'ordre de l'erreur commise sur la mesure des débits, donc assez faibles par rapport au total du flux hydrique. En outre, Mélarchez, les Avenelles et le Theil reçoivent des apports d'eau depuis l'aquifère et donc également les nitrates issus de cette nappe qui affleure sous l'horizon quasi imperméable du sol. Selon la dynamique hydrologique des nappes profondes, les polluants pourraient être présents dans les eaux du BVRE après un temps de latence assez long (supérieur à l'année) : ceci est surtout vrai au niveau des Avenelles et du Theil qui sont en interaction constante avec la nappe hydrogéologique. Mais cela se produit également à Mélarchez où la moyenne annuelle des concentrations en nitrates a doublé sur 20 ans. L'azote accumulé dans le cycle de Mélarchez semble constituer actuellement un grand stock dont une petite partie est constamment et progressivement relarguée au cours des années.

La zone entièrement forestière et hydromorphe du bassin de Choqueuse ne semble pas atténuer de façon significative les flux azotés cependant, un léger abattement est repéré pour les crues printanières. Elle contribue même faiblement au flux total d'azote nitrique qui la traverse via le rû, flux provenant du sous-bassin de Goins lors d'épisodes de crue par exemple. Cette absence d'abattement est pour grande partie due au rû trop profond pour que l'eau puisse déborder sur le sol forestier lors de crues. En revanche, elle permet de diluer le flux de polluant en provenance du sous-bassin de Goins. L'étude du bassin entièrement forestier (Quatre Cents) nous a permis de caractériser l'ordre de grandeur d'un apport forestier en NO_3^- mais également de conforter le fait que Goins soit, au même titre que Mélarchez, un bassin initiateur de la pollution azotée d'origine agricole.

Afin de pouvoir limiter la pollution azotée dans ce type de bassin, il serait intéressant de savoir si une intervention au niveau forestier ne pourrait pas être efficace. Il faudrait pouvoir caractériser la part des écoulements de surface/subsurface et profonds, et connaître la part du flux hydrique provenant de Goins au niveau de la zone forestière de Choqueuse. Cela nécessite la mise en place d'un protocole de datation isotopique de l'eau. Nous pourrions également recalibrer le fossé afin de permettre un débordement de l'eau lors de crues. Le recueil et l'étude des données se poursuit : approfondissement de la connaissance du fonctionnement hydrologique du BVRE de l'Orgeval ainsi que de la dynamique de restitution des nitrates par ses sous-bassins amont. Deux types de modèles peuvent alors être utilisés pour essayer de prédire la qualité de l'eau à l'exutoire du BVRE de l'Orgeval, et par conséquent la qualité de l'eau du bassin de la Seine : l'utilisation d'un modèle fonctionnant à l'échelle parcellaire tel que STICS (Brisson *et al.*, 1998) – échelle à laquelle est produit l'excédent de matière active pouvant être lessivé – servirait éventuellement à prédire la qualité des eaux moyennes à l'exutoire de chaque sous-bassin amont, puis le couplage de STICS avec MODCOU (Cabon, 1993 ; Geng, 1988 & Ledoux, 1980) permettrait à ce dernier de simuler plus précisément la contribution des bassins ruraux amont drainés dans la constitution de la qualité de l'eau.

Pour ce faire, STICS qui est un modèle de bilans (hydrique et nitrique) et de rendement des cultures fonctionnant à l'échelle parcellaire a été adapté à la simulation de terrains drainés. Il pourra être utilisé dans le contexte de bassins versants hydromorphes drainés, types de bassins très présents dans l'ouest de la France et dans la région parisienne, ou dans le cas de bassins versants non drainés.

4. Remerciements

Les calculs de flux n'auraient pas été possibles sans le travail du laboratoire chimique du Cemagref – Antony, au total 2044 échantillons ont été analysés depuis le début de l'étude.

5. Références

Arlot M.-P. (1999). Nitrates dans les eaux. Drainage acteur, drainage témoin? Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 446 p.

Billen G., Garnier J. & Le Guern G. (1998). SENEQUE 1.3, notice de présentation, Programme PIREN-Seine, UMR Sisyphe.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.-M., Meynard J. M. & Delécolle R. (1998). STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, **18**, pp 311-346.

Cabon F. (1993). Modélisation du cycle de l'azote dans le système sol-eau-plante ; du lysimètre au bassin hydrologique. Thèse de Doctorat Thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

Geng Q.Z. (1988). Modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert des nitrates dans un système hydrologique. Thèse de Doctorat Thesis, Ecole des Mines de Paris.

Ledoux E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de Docteur-Ingénieur Thesis, Ecole des Mines de Paris, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

Lesaffre B. (1988). Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, *Etudes – Hydraulique agricole*, Cemagref, **4**, 334 p.