



HAL
open science

Sources et puits d'eau et de polluants sur des bassins versants élémentaires

Marine Riffard, Julien Tournebize, Vazken Andréassian, Patrick Ansart, Cédric Chaumont, Nadine Derlet, Cyril Kao, Danielle Ridet

► **To cite this version:**

Marine Riffard, Julien Tournebize, Vazken Andréassian, Patrick Ansart, Cédric Chaumont, et al.. Sources et puits d'eau et de polluants sur des bassins versants élémentaires. [Rapport de recherche] irstea. 2001, pp.27. hal-02600840

HAL Id: hal-02600840

<https://hal.inrae.fr/hal-02600840>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sources et puits d'eau et de polluants sur des bassins versants élémentaires

M. Riffard, J. Tournebize, V. Andréassian, P. Ansart, C. Chaumont, N. Derlet, C. Kao, D. Ridet
Cemagref
BP 44
92163 Antony cedex

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
1.1. PRÉSENTATION DU TERRAIN D'EXPÉRIENCE : L'ORGEVAL, AFFLUENT DU GRAND MORIN ...	2
1.2. SUIVI EXPÉRIMENTAL	2
1.3. INSERTION DANS LE PROGRAMME GÉNÉRAL DU PIREN-SEINE	3
2. CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT D' HYDROSYSTÈMES PURS ET MIXTES	3
2.1. PRÉSENTATION DES TROIS MILIEUX (FORESTIER, MIXTE AGRICOLE-FORESTIER, AGRICOLE)	4
2.2. CALCUL DES FLUX D'EAU ET DE SOLUTÉS : CONFRONTATION DES INTRANTS ESTIMÉS AUX EXPORTATIONS MESURÉES	4
2.3. ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE DILUTION OU D'ENTRAÎNEMENT : FONCTIONNEMENT À L'ÉCHELLE DE L'ÉVÈNEMENT ET À L'ÉCHELLE DE LA SAISON	9
2.4. LE CAS DU BASSIN DU MÉLARCHEZ	11
3. FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE D'UNE ZONE FORESTIÈRE À L'EXUTOIRE D'UN BASSIN VERSANT AGRICOLE	12
3.1. SYNTHÈSE DES TROIS ANNÉES DE MESURE DE FLUX DE POLLUANTS À L'ÉCHELLE DE DEUX BASSINS VERSANTS EMBOÎTÉS.....	12
3.2. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS : MISE EN ÉVIDENCE DU FONCTIONNEMENT DE LA ZONE INTERMÉDIAIRE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS (SAISON ET ÉVÈNEMENT).....	14
3.3. BILAN ENTRÉE-SORTIE DE LA ZONE INTERMÉDIAIRE ET INTÉRÊT DU SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE POUR LA COMPRÉHENSION DE SON FONCTIONNEMENT	15
3.4. VALIDATION DU FONCTIONNEMENT DE LA ZONE INTERMÉDIAIRE PAR COMPARAISON À UN BASSIN PUREMENT FORESTIER.....	16
4. QUELLES RÈGLES DE COMPOSITION DU SIGNAL HYDROCHIMIQUE D'UNE ZONE INTERMÉDIAIRE À L'EXUTOIRE D'UN BASSIN VERSANT MIXTE ?	19
4.1. ÉTUDE SUR LE COMPORTEMENT MIXTE.....	19
4.2. PEUT-ON DÉTERMINER DES RÈGLES SIMPLES DE COMPOSITION ?	19
5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	26
5.1. RÉSULTATS ACQUIS	26
5.2. PERSPECTIVES	27
6. BIBLIOGRAPHIE	27

1. Introduction

1.1. Présentation du terrain d'expérience : l'Orgeval, affluent du Grand Morin

Le bassin versant de recherche 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. Le Grand Morin est lui-même un affluent de la Marne.

L'Orgeval comprend plusieurs sous-bassins étudiés actuellement (Fig. 1) :

- Goins (1,3 km² : ordre 1) est un bassin agricole fortement anthropisé (drainé à 80 % par des tuyaux enterrés);
- 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 (non drainé);
- Mélarchez (7,1 km² : ordre 2) est un bassin entièrement agricole et fortement anthropisé (drainage > 90 %).

Ces bassins sont emboîtés dans le bassin des Avenelles (45,7 km² : ordre 3), lui-même inclus dans le bassin de l'Orgeval (104 km² : ordre 3).

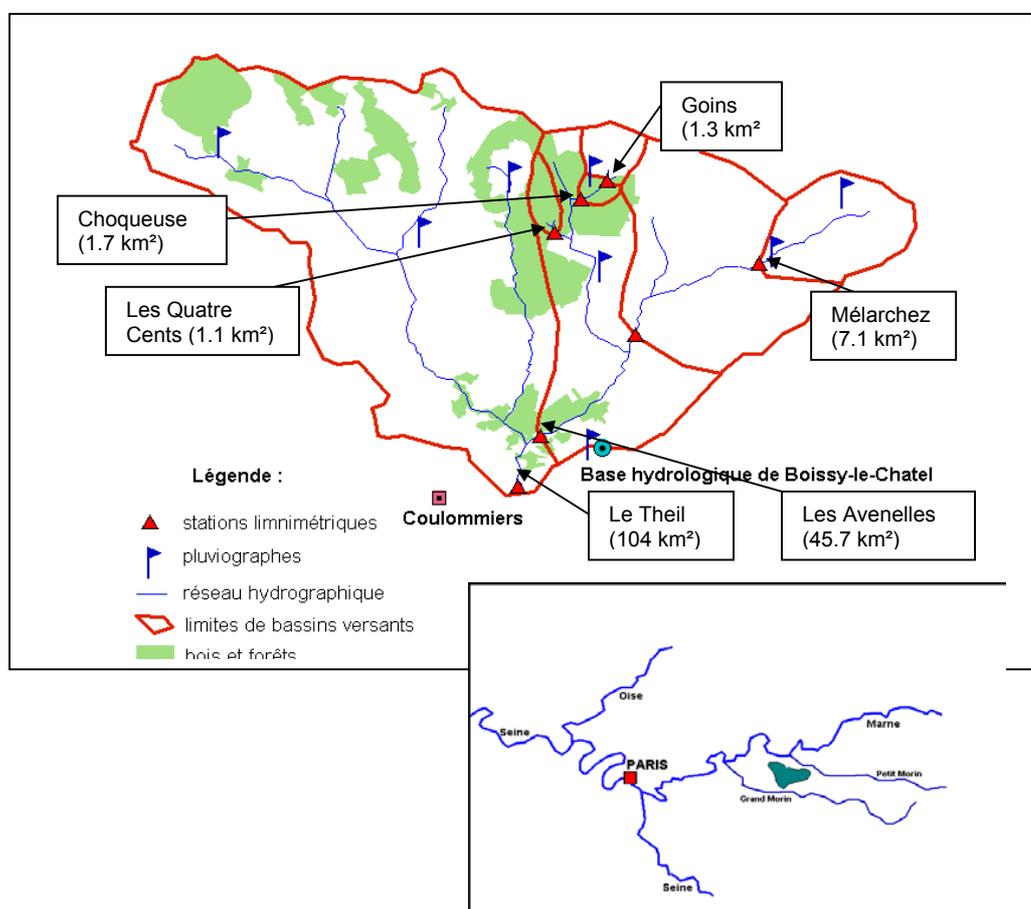


Figure 1: Localisation des sites étudiés sur le bassin versant de recherche de l'Orgeval.

1.2. Suivi expérimental

Dans le cadre du programme PIREN-Seine, trois nouvelles stations de suivi ont été installées. 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.

Le bassin des Quatre Cents (1.1 km²) sert de contrôle entièrement forestier. La station a été mise en service début janvier 2000 et fait depuis l'objet d'un suivi complet à l'instar de Goins et Choqueuse. Elle sert de référence pour les apports forestiers en terme de flux de chlorures et de nitrates.

Le bassin versant de Mélarchez (7 km²) est suivi depuis les débuts du bassin en 1962. Les prélèvements d'échantillons d'eau à Mélarchez, effectués depuis 1975, 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.

Sous-bassin	Équipement	Types de mesure	Date de mise en place
Goins	Station limnimétrique (flotteur) + échantillonnage instantané journalier + asservissement aux débits	Débits NO ₃ , NO ₂ , NH ₄ , PO ₄ , Cl et conductivité	Novembre 1998
Choqueuse	Station limnimétrique (flotteur) + échantillonnage instantané journalier + asservissement aux débits	Débits NO ₃ , NO ₂ , NH ₄ , PO ₄ , Cl et conductivité	Novembre 1998
Quatre Cents	Station limnimétrique (flotteur) + échantillonnage instantané journalier + asservissement aux débits	Débits NO ₃ , NO ₂ , NH ₄ , PO ₄ , Cl et conductivité	Janvier 2000
Mélarchez	Station limnimétrique (flotteur) + échantillonnage d'eau sur trois jours (mélange)	Débits NO ₃ , NO ₂ , PO ₄ , MES	Débits : 1962 Qualité : Août 1975
Avenelles	Station limnimétrique (flotteur)	Débits	Février 1962
Theil	Station limnimétrique (flotteur)	Débits	Janvier 1962

Tableau 1 : Récapitulatif des équipements installés sur le bassin versant de l'Orgeval

1.3. Insertion dans le programme général du PIREN-Seine

Cette étude, effectuée dans le cadre du thème 1 du PIREN-Seine, s'inscrit dans la volonté affichée du programme de « remonter vers l'amont » du bassin versant de la Seine, vers les sous-bassins d'ordre 1 à 3. La motivation est la compréhension des facteurs qui contrôlent le fonctionnement des petits bassins versants ruraux d'amont, et leur connexion avec les bassins d'aval et la nappe phréatique.

Ce travail se focalise sur les transferts d'eau à l'échelle de l'ensemble du bassin versant expérimental de l'Orgeval, et de nitrates à l'échelle des petits sous-bassins emboîtés situés à l'amont du bassin afin de comprendre les facteurs déterminants de la qualité des eaux à l'exutoire du bassin.

2. Caractérisation du fonctionnement d'hydrosystèmes purs et mixtes

Dans cette section, nous cherchons à caractériser les fonctionnements hydrologiques et chimiques des trois bassins versants retenus : le bassin versant forestier Quatre Cents, le sous bassin agricole drainé Goins, le bassin versant mixte forestier agricole Choqueuse. Le bassin versant forestier pur joue le rôle d'un bassin versant témoin, sans influence anthropique majeure. Du point de vue géochimique, notre analyse s'est concentrée sur les ions nitrates et chlorure. Cependant d'autres

mesures sont disponibles (ammoniac, nitrite, phosphore, ...), mais écartées devant les faibles valeurs de concentration mesurée pendant la durée du suivi.

Le chlorure sert de traceur géochimique du système en raison de ses caractéristiques conservatrice et inerte biologiquement. L'origine des chlorures est principalement d'ordre géologique, en négligeant les apports atmosphériques par les CFC, et par les engrais.

Le fonctionnement du bassin versant de Mélarchez étant un cas particulier, il sera détaillé indépendamment en 2.4.

2.1. Présentation des trois milieux (Forestier, Mixte agricole-forestier, Agricole)

Les trois sous-bassins étudiés ici sont d'ordre 1, et situés à l'amont du bassin versant de l'Orgeval.

Les flux d'eau et de polluants retrouvés à l'aval du bassin ont pour origine ces petits bassins amonts. Nous allons tenter dans cette partie, de quantifier la dynamique de ces systèmes, et leur contribution dans les exportations, aussi bien à l'échelle de l'événement qu'à celle de la saison hydrologique.

Ces bassins sont représentatifs, en terme d'occupation des sols, du plateau de la Brie, avec un bassin considéré comme purement agricole (Goins drainé à 80%), un bassin purement forestier (Quatre Cents), et un bassin mixte agricole-forestier (Choqueuse, combinaison de Goins et d'un complément forestier).

La dernière campagne d'étude (2000-2001), confirme l'analyse menée au cours des précédentes campagnes (1998-1999 et 1999-2000) : bassins versants à nappes superficielles, avec trois phases distinctes, la saison automnale de recharge des réserves du sol, où s'observent des écoulements sporadiques, la saison de drainage intense ou saison hydrologique avec un coefficient de restitution fort et une lame d'eau maximale, et la saison de disparition des nappes superficielles, où l'écoulement ne se produit qu'au cours d'averses intenses.

En terme de pédologie, on retrouve les mêmes sols à Goins (agricole), Choqueuse (mixte) et aux Quatre Cents (forestier) : sol peu profond de type Pseudo-Gley, avec une forte teneur en argile au-dessous de 1 m de profondeur, constituant un imperméable propice à la création de sols hydromorphes. Cette forte homogénéité pédologique rend la comparaison de ces bassins particulièrement intéressante, dans la mesure où leur différence de comportement peut être attribuée au drainage agricole et à l'occupation des sols.

2.2. Calcul des flux d'eau et de solutés : Confrontation des intrants estimés aux exportations mesurées

Dans cette partie, nous replaçons la dynamique hydrologique des trois sous-bassins étudiés par rapport aux sous-bassins suivis depuis 1962 (Melarchez, Avenelles et Theil).

2.2.1 Dynamique hydrologique des sous-bassins de l'Orgeval

On voit bien (Fig. 2) que les bassins de Goins, Quatre Cents et Choqueuse ont des comportements très similaires, et des saisons hydrologiques identiques (aucun décalage au pas de temps journalier).

Pour tous les sous-bassins, les saisons sont bien marquées. Au début de la période d'étude, les pentes durant la saison sèche sont très faibles, voire nulles, les années 1997 à 1999 (respectivement : 580, 590 et 600 mm de pluie) ayant été des années sèches, avec tarissement des rus à l'amont du bassin durant l'été, tandis que 2000 et 2001 (850 et 700 mm) peuvent être qualifiées d'années humides, sans tarissement (pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant de l'Orgeval : 667 mm).

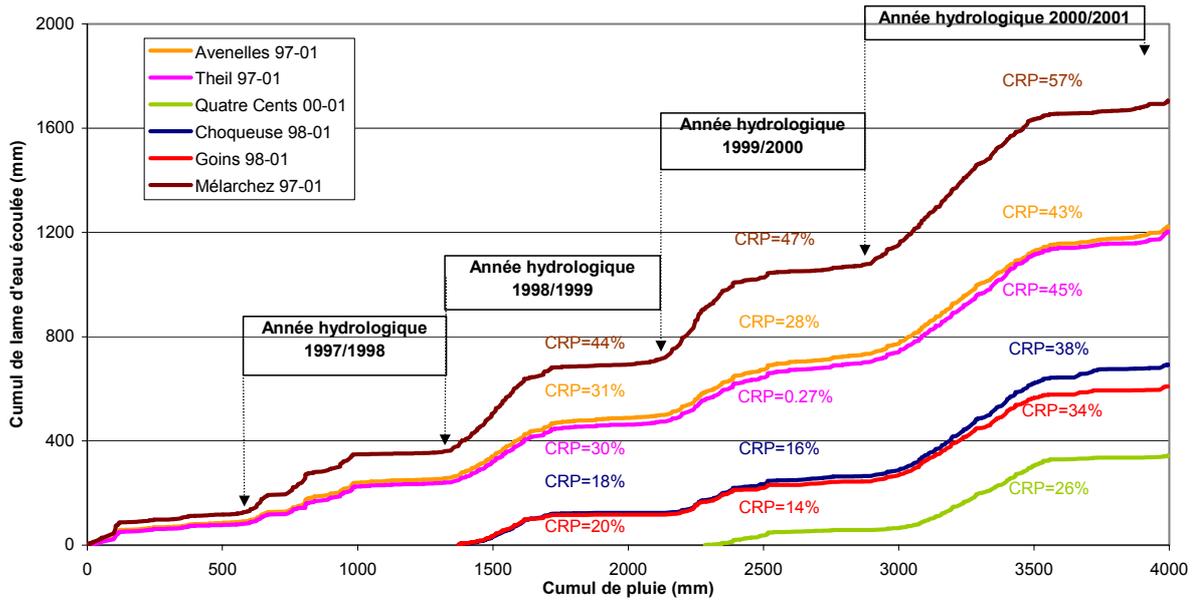


Figure 2: Représentation de la saisonnalité des écoulements des bassins d'ordre 1 à 3 du bassin versant de l'Orgeval

La concordance des saisons et des temps de concentration entre les trois bassins de Goins, Choqueuse et Quatre Cents nous permet de comparer les flux d'eau des trois bassins.

Les bassins avals, d'ordre 3 (Avenelles et Theil), se comportent de façons très similaires, et ce, quelles que soient la saison ou les conditions météorologiques (tableau 2).

Bassins\Périodes	Année 98-99		Saison 98-99		Année 99/00		Saison 99/00		Année 00/01		Saison 00/01	
	CRP brut	CRP - ETP	CRP brut	CRP - ETP	CRP brut	CRP - ETP	CRP brut	CRP - ETP	CRP brut	CRP - ETP	CRP brut	CRP - ETP
Le Theil	30%	108%	60%	93%	27%	87%	48%	87%	45%	90%	68%	87%
Les Avenelles	31%	113%	61%	95%	28%	90%	49%	88%	43%	86%	65%	83%
Mélarchez	45%	163%	94%	146%	47%	133%	104%	130%	57%	110%	91%	115%
Choqueuse	18%	92%	36%	56%	16%	51%	34%	54%	38%	73%	64%	84%
Goins	17%	86%	35%	55%	14%	47%	31%	49%	34%	65%	57%	74%
Quatre Cents	-	-	-	-	-	-	15%	33%	26%	51%	47%	63%

Tableau 2 : Coefficients de Restitution de la Pluie (CRP)

Une année hydrologique correspond à un cycle sur lequel se suivent une saison automnale de recharge des nappes, une saison de drainage intense, et une saison de disparition des nappes superficielles. Une saison hydrologique correspond à une saison de drainage intense et une saison de disparition des nappes superficielles.

Les coefficients de restitution de la pluie sont obtenus par les relations : $CRP\text{ brut} = D / P$ et $CRP\text{ net} = D / (P - ETP)$, avec D = lame d'eau drainée sur la période étudiée (mm), P = Pluie précipitée (mm), et ETP = Evapotranspiration potentielle (mm).

On observe également que le bassin versant mixte Choqueuse restitue plus d'eau que le bassin agricole Goins, qui lui, ne restitue pas autant qu'on pouvait l'attendre d'un bassin drainé à 80%. Des infiltrations profondes sur Goins ne sont pas à exclure.

Le bassin de Mélarchez est indéniablement celui dont le temps de concentration est le plus rapide, avec des saisons extrêmement marquées, ce qui concorde avec le fait qu'il est quasiment totalement drainé. Proportionnellement à sa surface, il draine également plus d'eau que tous les autres bassins, ce qui est confirmé par le calcul des coefficients de restitution sur différentes périodes (Tableau 2). En saison hivernale, le bassin versant de Mélarchez peut restituer plus d'eau qu'il n'en reçoit par les précipitations. Des apports extérieurs, probablement des échanges avec la nappe souterraines sont probablement responsables de cette forte restitution. Les mesures de qualité indiquent qu'il y a effectivement des échanges avec un autre système, comme cela sera montré dans la partie 2.4.

2.2.2 Calcul des flux de solutés

L'intérêt du système que nous étudions (système amont à caractère hydromorphe) qui ne présente pas ou peu d'interconnexion avec les systèmes hydrogéologiques souterrains, permet d'émettre l'hypothèse que, tout le lessivage se retrouve dans les eaux de surface et dans le réseau hydrographique. Le système étudié devient un système fermé. Dans ce contexte il est alors possible d'établir des bilans d'entrée-sortie (ceci n'était pas le cas pour le bassin versant de Mélarchez pour lequel il apparaît que des apports souterrains non négligeables existent).

Dans les paragraphes suivants, le rôle du chlorure est celui d'un traceur de l'eau. Il provient pour partie des apports atmosphériques (CFC, ...) mais principalement du sol et du sous-sol (socle sédimentaire maritime), ce qui constitue un bruit de fond géochimique si l'eau transite par le sol.

Les apports¹

Dans tous les cas, nous considérons les apports atmosphériques. Leur détermination pour les bassins versants forestiers sera reprise pour les bassins versants agricoles. Nous estimons les intrants azotés au moyen de données fournies par l'INRA Mirecourt et des enquêtes de terrain. Ces données permettent d'établir les bilans entrées-sorties de la zone agricole.

- Apports atmosphériques

Un suivi de la qualité des eaux de pluie (concentration moyenne mensuelle) a permis d'estimer les entrées atmosphériques d'azote nitrique dans les bassins versants. Sur le suivi du 28/02/1997 au 24/10/01, la concentration en nitrate (mgNO_3/l) varie entre moins de 1 mg/l à 16 mg/l , pour une concentration moyenne représentative de 3.2 mgNO_3/l . Ceci correspond alors à un apport annuel moyen de 4.8 kgN/ha (de 2 kgN/ha en 1998 à 6.5 kgN/ha en 2000). Cet apport est faible mais non négligeable pour certaines années. Cependant la concentration associée est faible (<10 mg/l dans 90% du temps).

Pour le bassin versant forestier (Quatre Cents), nous nous restreindrons à ce type d'apport. Nous considérerons comme négligeable les autres formes d'apport notamment les réactions biogéochimiques liées à l'azote. Le pH du sol à 6.5, sous-entend un équilibre au niveau du sol des réactions de minéralisation, dénitrification et réorganisation (Nadelhoffer, 2001). Nous n'avons pas tenu compte aussi de l'impact de la tempête de décembre 1999, en raison de la méconnaissance de l'état initial, antérieur à décembre 1999, dans le bassin forestier.

- Apports anthropiques

Outre les apports atmosphériques, dans les bassins agricoles et mixtes, la principale source d'intrants azotés est constituée par les apports anthropiques (amendements agricoles).

Le bassin de l'Orgeval se situe dans la petite région agricole (PRA) de Brie Laitière. Par le biais du recensement général agricole (RGA) de 2000 et l'aide de l'INRA Mirecourt, nous pouvons définir la répartition des cultures (assolement) ainsi que les différentes successions culturales employées (tableau 3).

Culture	Blé	Maïs grain	Betterave	Pois	Prairie	Colza	Orge
Pourcentage de superficie	43%	12%	3%	11%	6%	7%	6.5%
Fertilisations (U=unité : kgN/ha)	50 U février 60 U mars 40 U avril 40 U mai	100 U avril 80 U au semis (mai)	150 U au semi (mars)			100 +100 U février	130 U au semi (mars)
Successions de culture	Maïs/Blé/Orge : 20%		Maïs/Blé/Blé : 15%		Bett/Blé/Pois/Blé : 12%		Colza/Blé/pois/Blé : 28%

Tableau 3: Assolements des parcelles agricoles, fertilisations et successions culturales du bassin versant de l'Orgeval, en 2000

¹ Les apports étudiés ici ne concernent que l'azote nitrique (nitrate).

Sur les bassins versants agricoles, le blé représente très largement la culture la plus répandue en surface. Nous pouvons alors estimer que quel que soit le bassin versant agricole, le système reçoit au moins 150 unités d'azote par hectare, entre février et avril. Nous supposons que les agriculteurs adhèrent au code des bonnes pratiques agricoles et que par conséquent, les fertilisations sont ajustées aux objectifs de rendement, sans surplus d'azote pour le milieu (hypothèse de travail faite en l'absence de données sur les rendements). Nous remarquons que pour des années climatiques favorables aux cultures, les exportations d'azote nitrique se réduisent à la fourniture naturelle non contrôlée d'azote par le sol par minéralisation sous estimée au départ par l'agriculteur (fortement variable selon les années).

Les exportations

En matière d'exportations azotées, Honisch *et al*, (2002) s'accordent sur les risques croissants de perte de nitrate selon l'occupations du sol et les cultures : Forêt<Orge<Blé<Maïs. Nous nous proposons dans ce paragraphe d'estimer les exportations en nitrate et chlorure de chaque bassin versant étudié. Du point de vue méthodologique, les flux de soluté sont obtenus à partir des débits mesurés et des concentrations associées, à un même pas de temps. Les résultats sont consignés au tableau 4 pour les nitrates, et au tableau 5 pour les chlorures.

Saison hydrologique et Exportations en Nitrate	Forestier Quatre Cents		Agricole Goins		Mixte Choqueuse	
	Flux Spé	Conc de Fl	Flux Spé	Conc de Fl	Flux Spé	Conc de Fl
ETE 09/05/99 au 18/12/99			0.6	36	0.4	22
HIVER 18/12/99 au 10/05/00	0.7	6	8.4	35	8.8	33
ETE 10/05/00 au 07/11/00	0.2	4	1.9	22	1.6	17
HIVER 07/11/00 au 28/04/01	1.5	3	11.8	19	10.4	14
ETE 28/04/01 au 10/10/01 (*)	0.2	2	3.7	32	4.5	32

Tableau 4: Exportations par saison hydrologique en Nitrate (Flux spécifique et Concentration de flux) sur les trois bassins versants de l'Orgeval suivis entre le 09/05/1999 et le 10/10/2001 () saison partiellement calculée en raison d'une panne de préleveur, mais à titre indicatif*

A l'échelle de l'année hydrologique, nous différencions la saison hivernale de la saison estivale. Il est clair que les flux exportés dépendent de l'hydrologie des bassins versants, l'eau étant le vecteur de la pollution et plus particulièrement pour les nutriments très solubles tels que les nitrates. Les exportations hivernales (entre 1.5 pour le bassin versant forestier et 11.8 kgN/ha pour le bassin agricole), avec des débits soutenus sont très largement supérieures aux exportations estivales (entre 0.2 pour le bassin versant forestier et 8.4 kgN/ha pour le bassin agricole), avec des débits intermittents.

La comparaison des saisons hydrologiques entre elles apporte des éléments de réflexion complémentaires. Sur tous les bassins suivis, l'été 2001² exporte déjà plus que les autres étés (1999, 2000). Ceci s'explique par la pluviométrie abondante qui a assuré un débit soutenu des ruisseaux élémentaires sur toute la période estivale, fait exceptionnel pour la région. Sur les bassins agricoles, les deux hivers de suivi (1999/2000 et 2000/2001) exportent des quantités de nitrates similaires (8 kgN/ha) malgré une lame d'eau écoulée deux à trois fois plus importantes (107 et 294 mm en 1999/2000 contre 299 en 2000/2001).

Nous pouvons alors comparer les exportations en chlorures qui nous servent de traceur témoin (tableau 5).

² Comparaison partielle en terme de quantification en raison d'une panne d'un préleveur

Saison hydrologique et Exportations en Chlorure	Forestier Quatre Cents		Agricole Goins		Mixte Choqueuse	
	Flux Spé	Conc de Fl	Flux Spé	Conc de Fl	Flux Spé	Conc de Fl
ETE 09/05/99 au 18/12/99			1.3	18	1.4	16
HIVER 18/12/99 au 10/05/00	8.6	18	13.3	12	15.4	13
ETE 10/05/00 au 07/11/00	3.7	21	9.1	24	7.9	21
HIVER 07/11/00 au 28/04/01	36.7	11	32.5	11	40.3	12
ETE 28/04/01 au 10/10/01 (*)	5.4	15	7.8	15	7.3	12

Tableau 5 : Exportations par saison hydrologique en chlorure (Flux spécifique et Concentration de flux) sur les trois bassins versants de l'Orgeval suivis entre le 09/05/1999 et le 10/10/2001.

(*) saison partiellement calculée en raison d'une panne de préleveur, mais à titre indicatif

Nous constatons que l'exportation de chlorure sur le bassin mixte de Choqueuse est multipliée par un facteur 2.6 entre l'hiver 1999/2000 (15.4 kg Cl/ha) et l'hiver 2000/2001 (40.3 kg Cl/ha). Ce rapport est proche de celui de la lame d'eau écoulée (2.9) pendant les mêmes périodes hivernales (de 118 mm durant l'hiver 1999/2000 à 338 mm durant l'hiver 2000/2001). En revanche, les exportations hivernales en nitrate ne suivent pas cette évolution. Les variations semblent atteindre un seuil maximal à 10 kg N/ha. Nous pouvons alors distinguer le comportement des nitrates du comportement des chlorures, en associant un stock limité de nitrate à exporter et un stock non limité de chlorure à exporter dans les bassins versants agricoles. Dans ce contexte, il apparaît évident que ce sont les pratiques culturales et plus spécifiquement les reliquats entrée hiver qui sont à l'origine de ce stock de nitrate potentiellement lessivable.

Nous comparons, en figure 3, les cumuls de flux de nutriments exportés (chlorure et nitrate) des deux bassins purs (agricole et forestier) en utilisant des variables adimensionnelles (rapport du cumul sur le total). Alors que pour les chlorures, nous ne distinguons pas de différence de comportement pour l'exportation entre les deux bassins purs (agricole et forestier), il apparaît que l'occupation du sol du bassin joue un grand rôle dans la dynamique temporelle des exportations de nitrates.

Au niveau du bassin versant forestier, les tableaux des exportations et les figures des flux apportent les éléments de réflexion suivants :

- les exportations de chlorure du bassin versant forestier sont similaires à celles exportées par le bassin agricole (Goins), ce qui démontre la similarité du fonctionnement hydrologique (le chlorure sert de traceur de l'eau) ;
- les exportations en nitrate sont très faibles (entre 0.9 et 1.7 kgN/ha/an), mais surtout elles sont inférieures aux apports atmosphériques estimées (entre 2 et 6.5 kgN/ha/an).

Le bilan annuel entrée-sortie du bassin forestier reste très favorable en ce qui concerne le risque de perte en nitrate. Un bassin versant forestier exporterait moins de nitrate qu'il n'en reçoit par voie atmosphérique. Dans l'exemple du suivi, le bilan annuel pour les bassins agricoles et mixtes est aussi positif. Les exportations d'azote sont relativement faibles (une dizaine de kgN/ha) comparées aux apports (plusieurs centaines de kgN/ha), malgré une pluviométrie favorable aux exportations. Ceci montre globalement le bon ajustement des amendements effectué par les agriculteurs par rapport aux besoins des plantes.

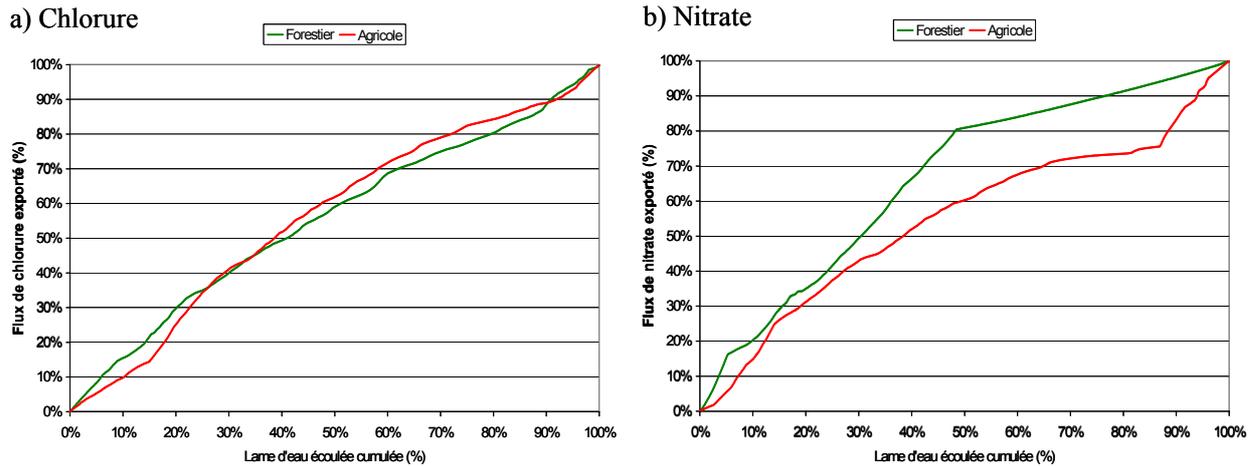


Figure 3: Dynamique temporelle des exportations de nutriments en fonction du cumul relatif de la lame d'eau écoulée sur les bassins forestier et agricole du 29/01/00 au 20/09/01, a) pour les Chlorures, b) pour les Nitrates

2.3. Etude des phénomènes de dilution ou d'entraînement : fonctionnement à l'échelle de l'évènement et à l'échelle de la saison

L'étude des bilans effectuée aux sections précédentes à l'échelle de la saison ne permet pas d'approcher les comportements spécifiques au cours de l'année du transfert de soluté transitant plus ou moins dans le compartiment du sol. C'est ce que nous nous proposons d'analyser dans cette section en repartant de l'échelle de l'évènement pour remonter à l'échelle saisonnière.

Dans cette section, nous analysons les concentrations en soluté issues des prélèvements de terrain (à pas de temps variable selon le débit) et des concentrations de flux, qui sont le rapport des quantités exportées sur les quantités d'eau écoulée. L'utilisation de la concentration de flux se justifie pour plusieurs raisons :

- elle donne plus de poids aux forts débits donc aux plus fortes exportations ;
- elle permet une estimation de la sensibilité réelle du sol au lessivage ;
- pour le gestionnaire elle permet facilement de déterminer la quantité de nitrate lessivée par un litre d'eau écoulée ;

L'étude des chémoigrammes (variation des concentrations en soluté au cours des crues) met en évidence, pour l'ensemble des sites des comportements de type de ceux décrits par Arlot (1999). Les deux principaux comportements de lessivage observés au cours des crues, « comportements d'entraînement » et « comportement de dilution » ont pu être interprétés et surtout démontrés comme résultant de la localisation du soluté dans le sol au moment de la crue :

- l'entraînement (Fig. 7) se manifeste par un pic de concentration nitrique au cours d'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) ;
- la dilution (Fig. 7) se manifeste par une chute de la concentration nitrique au cours d'un pic de crue. Ce mécanisme se produit lorsque le soluté réside dans le bas du profil de sol, par exemple lorsqu'il constitue le reliquat en entrée d'hiver (début de l'hiver : premières crues hivernales).

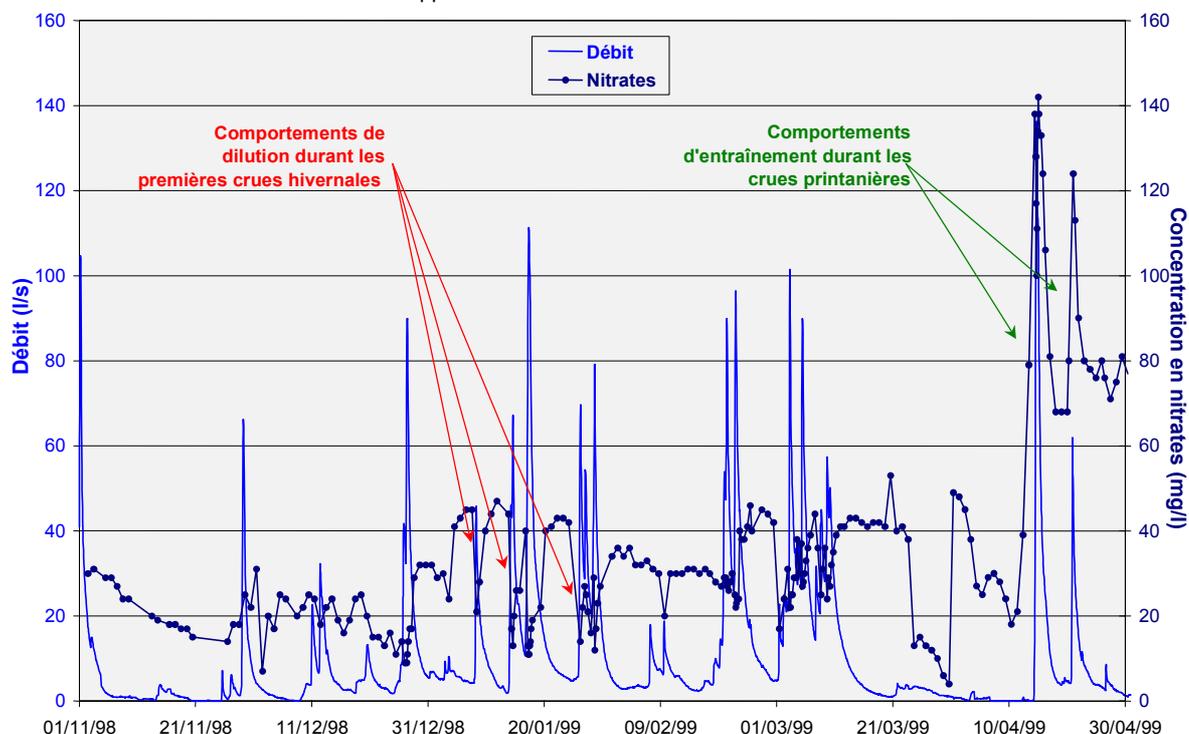


Figure 4 : Evolution conjointe de la concentration en nitrates et du débit sur le bassin agricole de Goins illustrant les comportements de dilution et d'entraînement lors de lessivages

Il apparaît clairement qu'à l'échelle de temps de l'événement, l'évolution des concentrations pendant les crues est fortement dépendantes des écoulements de l'eau et de la répartition de l'azote lessivable dans le sol (Bélamie *et al*, 1986). La montée des concentrations correspond à un drainage important des parcelles agricoles. L'azote inutilisé pour les cultures et l'azote minéralisé dans le sol durant l'automne se trouvent ainsi mobilisés et exportés vers le milieu aquatique en des temps très courts. Puis la diminution de la concentration en nitrate est lié à un phénomène de dilution provoquée par des apports de pluie excessive (le sol pouvant être considéré comme un réservoir de soluté dans lequel les eaux de pluie se mélangent avec l'eau du sol).

En passant de l'échelle événementielle à l'échelle saisonnière, la contribution en nitrate pour les exportations n'est pas répartie de façon identique tout au long de l'année. Elle est maximale lors des premières crues hivernales (mobilisation de l'azote nitrique stocké dans le sol pendant la saison estivale, associée au reliquat d'entrée d'hiver), et lors des crues printanières (mobilisation des nitrates par entraînement des fertilisants associée à une reprise de la minéralisation). Notons que les exportations estivales sont essentiellement la résultante des épisodes orageux qui contribuent aux fortes pertes (Fig.5).

Les concentrations de flux (tableaux 5 et 6) baissent en été (de 33 mgNO₃/l pendant l'hiver 1999/2000 à 13 mgNO₃/l pour l'été 2000 sur le bassin mixte de Choqueuse). Nous expliquons cette diminution d'une part par un débit moins élevé, et d'autre part, par la forme des apports pluviométriques (à caractère orageux en été donc à transfert rapide plutôt que diffus à transfert lent pendant l'hiver, ceci est expliqué en dessous) et par le stock de soluté mobilisable moins important du fait du prélèvement de la végétation.

Les nitrates sont d'origine fortement anthropique. Le lessivage est dépendant de la quantité apportée. 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 Mèlarchez ou Goins, sont les initiateurs de la pollution.

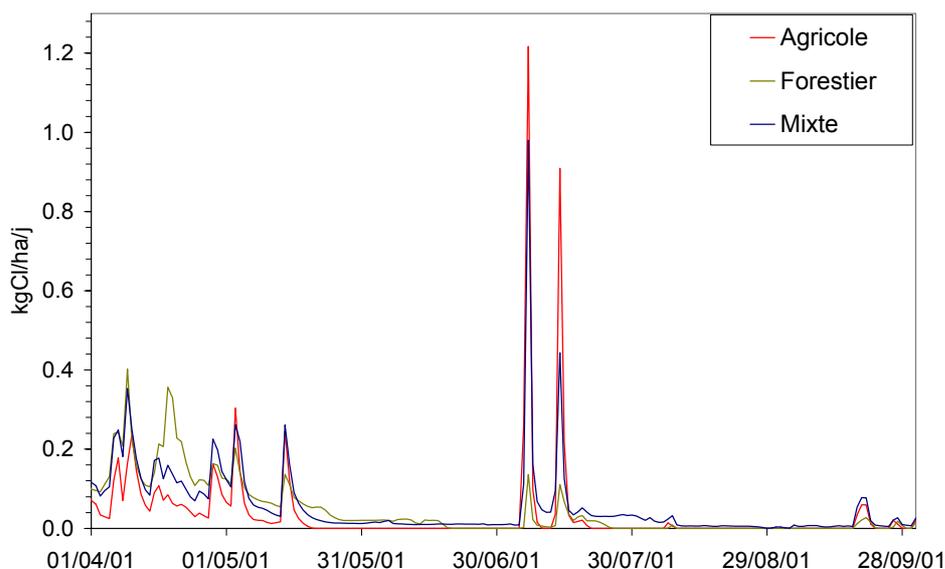


Figure 5: Evolution des flux spécifiques journalières de Chlorure (en kgCl/ha/j) sur les bassins agricole (Goins), forestier (Quatre Cents) et mixte (Choqueuse) pendant la saison estivale du 01/04/01 au 30/09/01.

2.4. Le cas du bassin du Mélarchez

D'un point de vue hydrologique, le bassin de Mélarchez a des coefficients de restitution très forts et souvent supérieurs à la quantité de pluie qu'il a reçu. Des échanges avec un autre système comme une nappe profonde sont certainement responsables de ce phénomène.

En terme de qualité, des phénomènes similaires sont observés.

Saison hydrologique et Exportations en Nitrate	Agricole Mélarchez	
	Flux Spé	Conc de Fl
Flux spécifique (kg N/ha), et concentration de flux (mg NO ₃ /l)		
ETE 09/05/99 au 18/12/99	3.0	41
HIVER 18/12/99 au 10/05/00	35.5	54
ETE 10/05/00 au 07/11/00	6.9	39
HIVER 07/11/00 au 28/04/01	46.4	38

Tableau 6 : Exportations par saison hydrologique en Nitrates (Flux spécifique et Concentration de flux) sur le bassin de Mélarchez

En effet en faisant l'hypothèse que les pratiques culturales sont identiques sur l'ensemble du bassin versant de l'Orgeval, entre les deux bassins agricoles (Goins et Mélarchez) dont la superficie varie de 1.3 km² pour Goins et 7.1 km² pour Mélarchez, les exportations de nitrate ne sont pas comparables.

Le bassin agricole de Goins exporte environ 10 kgN/ha pendant la période hivernal contre 40 kgN/ha pour Mélarchez. Il est intéressant de noter que Mélarchez exporte beaucoup plus de nitrates que Goins, Choqueuse et Quatre Cents même réunis. Y a t'il une échelle ou surface seuil pour l'explication des non-linéarités (Choqueuse 1.7 km² et Mélarchez 7.1 km²) ? Néanmoins, il faut alors tenir compte d'une autre contribution déjà évoquée dans la partie hydrologie : la contribution d'une nappe souterraine. Cette nappe alimente le réseau hydrographique du bassin de Mélarchez. Sa concentration en nitrate est relativement constante dans le temps, ce qui permet d'exporter des quantités de nitrate supplémentaires, de celles apportées par les parcelles agricoles elles-mêmes, aussi bien en été qu'en hiver. Une relative stagnation (ou baisse modérée) des concentrations de flux en

nitrate sur le bassin versant agricole de Mélarchez sur une période estivale (Fig. 5) conforte et démontre la notion de contribution souterraine (apport de la nappe à concentration constante).

3. Fonctionnement hydrochimique d'une zone forestière à l'exutoire d'un bassin versant agricole

3.1. Synthèse des trois années de mesure de flux de polluants à l'échelle de deux bassins versants emboîtés

Après avoir mis en évidence quelques points clés du fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Orgeval, nous pouvons confronter ces résultats avec ceux obtenus sur la qualité des eaux afin de tenter de déterminer les origines de la pollution diffuse azotée. Nous étudions des bassins versants à nappes superficielles drainées où 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.

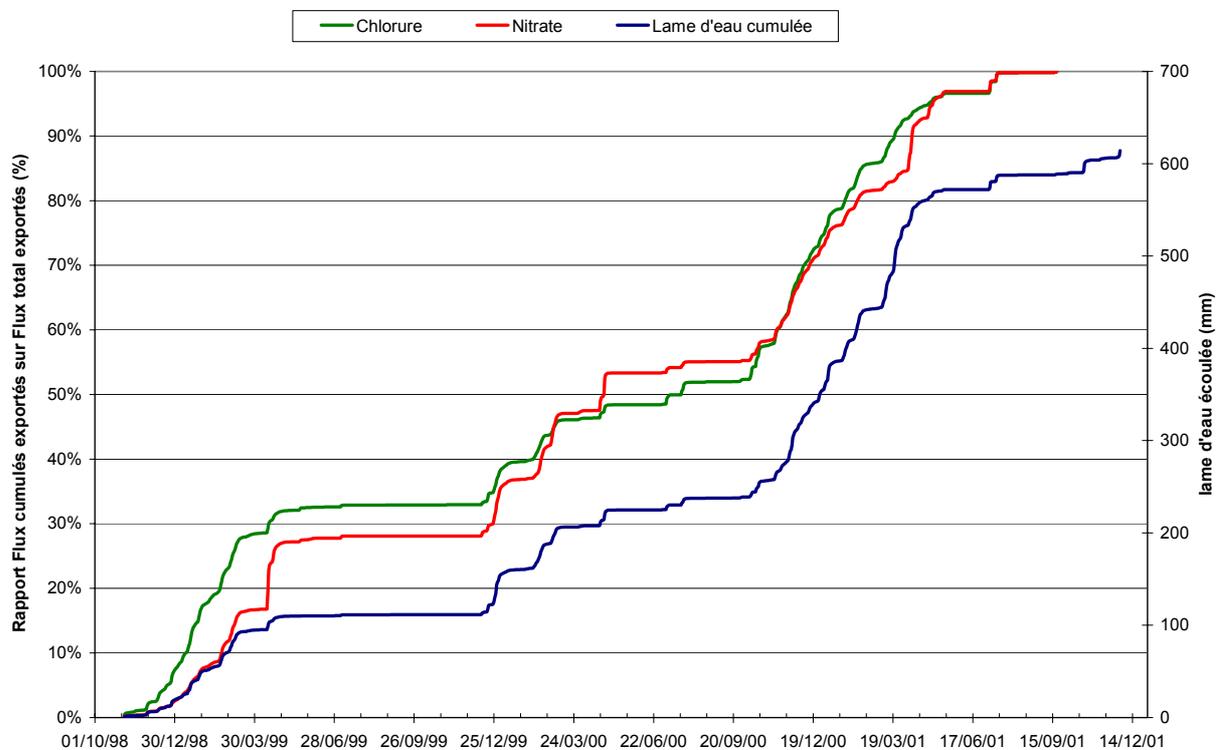


Figure 6 : Cumul d'eau écoulée et cumuls relatifs des flux d'azote nitrique et de chlore, par rapport au total sur la campagne de suivi 1998~2001 pour le bassin agricole de Goins

Au niveau d'un bassin, les dynamiques des nitrates et des chlorures diffèrent dans leur relation avec les lame d'eau écoulée. La comparaison des deux dynamiques de flux (NO_3^- et Cl^-) montre qu'au fur et à mesure des écoulements du bassin (Figure 6), le relargage des nitrates s'effectue moins régulièrement que celui du chlore, dont la courbe des flux est quasi parallèle à celle des flux hydriques, ce qui justifie son rôle de traceur géochimique (quasi naturel).

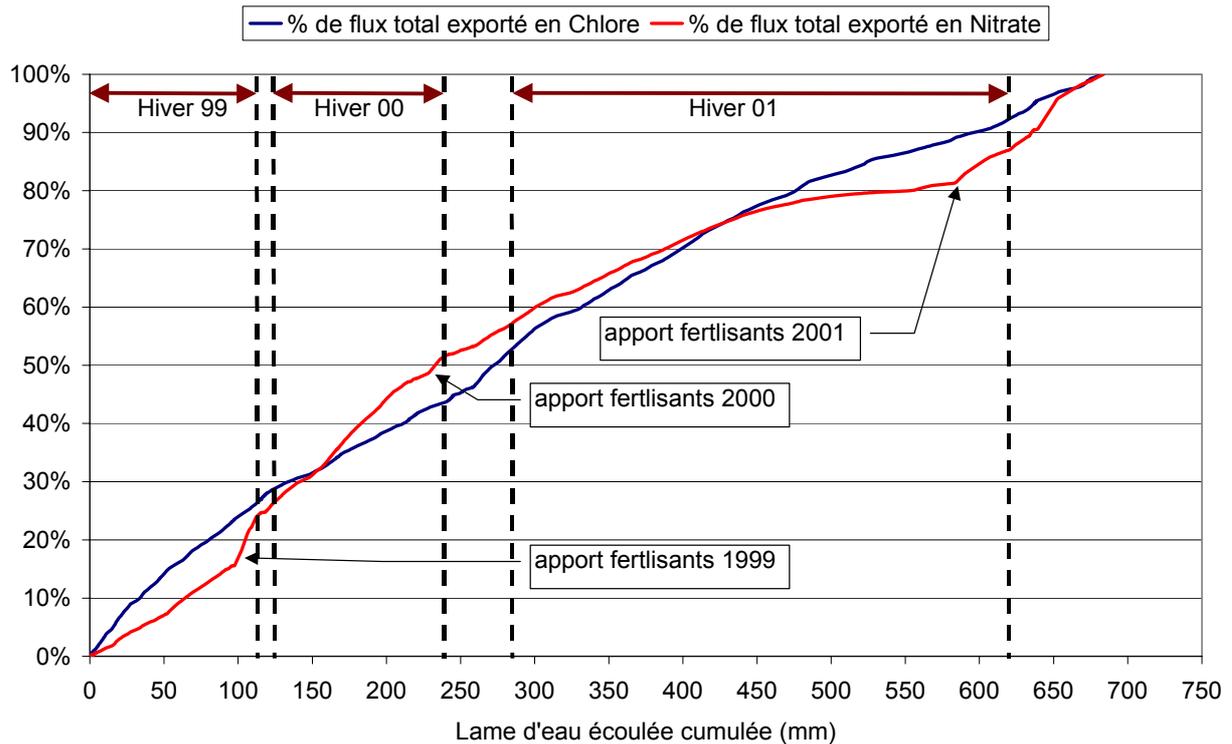


Figure 7 : Dynamique des transferts de flux de Chlore et de Nitrates sur le sous-bassin de Choqueuse

En variable adimensionnelle, pour s'affranchir de la différence de soluté, la courbe de lessivage en chlorure présente une allure beaucoup plus homogène et régulière (figure 7). En revanche la courbe des nitrates présente des épiphénomènes liés à l'activité agronomique et biologique. Les ruptures de pente existantes sur la courbe des nitrates sont essentiellement dues à des apports anthropiques, en tenant compte d'un certain temps de transfert dans le sol et le réseau selon les conditions climatiques (premières crues après fertilisation). Entre deux apports marqués de 1999 à 2001), nous distinguons une allure de courbe à tendance asymptotique. Après les apports de 1999, la proportion de nutriments exportés varie de façon importante (de 17 à 50% en 150 mm de lame d'eau écoulée) puis elle se stabilise au cours de l'hiver 2001, jusqu'aux apports 2001. Nous relevons une variation de moins de 5% de flux exportés pour une lame d'eau écoulée de 150 mm. Si nous associons à cette analyse les concentrations de flux, calculées au tableau 4, nous constatons une dilution croissante des nitrates entre l'hiver 1999/2000 et l'hiver 2000/2001 (de 35 mgNO₃/l à 18 mgNO₃/l sur le bassin agricole). Nous pouvons en conclure que les écoulements ont épuisé le stock d'azote du sol. Nous définissons alors entre deux ruptures de pente, ce que nous pouvons nommer un cycle pluriannuel de lessivage. Ce cycle permet d'estimer la quantité de lame d'eau écoulée nécessaire pour lessiver un stock maximal d'azote soit apporté par la fertilisation soit l'accumulation d'azote liée à un non prélèvement par la végétation jusqu'à un épuisement dans le compartiment du sol. Dans le cas du bassin versant agricole de Goins, pour une période caractérisée comme humide, en ne considérant que les apports par fertilisation de l'ordre de plusieurs centaines de kgN/ha, à priori sans défaut de prélèvement agronomique, le cycle de lessivage s'étale sur 500 mm de lame d'eau écoulée soit 2 années.

Cette notion de cycle s'applique aussi au bassin mixte. En effet les quantités et proportions de nitrates exportées par les bassins de Goins et Choqueuse sont très similaires pendant toute la durée du suivi. Ceci indique que la dynamique de lessivage du bassin mixte de Choqueuse est principalement conditionnée par Goins, le sous-bassin agricole situé en amont. En terme de concentration de flux, le bassin mixte se différencie par une concentration de flux en nitrate plus faible alors qu'en chlorure elle est équivalente.

Le fonctionnement du bassin mixte se calant sur celui agricole est alors simple. Il se scinde en trois phases : lessivage du stock d'azote du sol issu de la minéralisation automnale et du reliquat entrée

hiver de la culture pendant l'hiver hydrologique, puis vient se greffer, en fin de drainage, un pic des exportations lié aux amendements d'engrais organique ou minéral et de reprise de la minéralisation, et enfin une phase de tarissement lié à l'absence de pluie, ajoutée au dégorgement du sol qui aboutit à une diminution des exportations concomitante de la diminution de la lame d'eau écoulée.

Conformément à ce que nous pouvions attendre, et comparativement aux exportations azotées d'un bassin forestier pur, les bassins agricoles tels que Goins sont très largement contributifs de la pollution en nitrate du bassin versant de recherche de l'Orgeval par des exportations concentrées sur la période hivernale. La part de l'eau transitant par le compartiment du sol et qui se charge en nutriments solubles est à l'origine de la qualité de l'eau superficielle sur le bassin versant de l'Orgeval. La quantité lessivable sera d'autant plus importante que des déséquilibres apparaîtront : des déséquilibres naturels, non contrôlables associés aux conditions climatiques telles que des années humides ou des années de sécheresse ; des déséquilibres anthropiques a priori maîtrisables tels que des surfertilisations.

3.2. Interprétation des résultats : mise en évidence du fonctionnement de la zone intermédiaire à différentes échelles de temps (saison et événement)

3.2.1 Mise en évidence du fonctionnement de la zone forestière d'un point de vue hydrologique

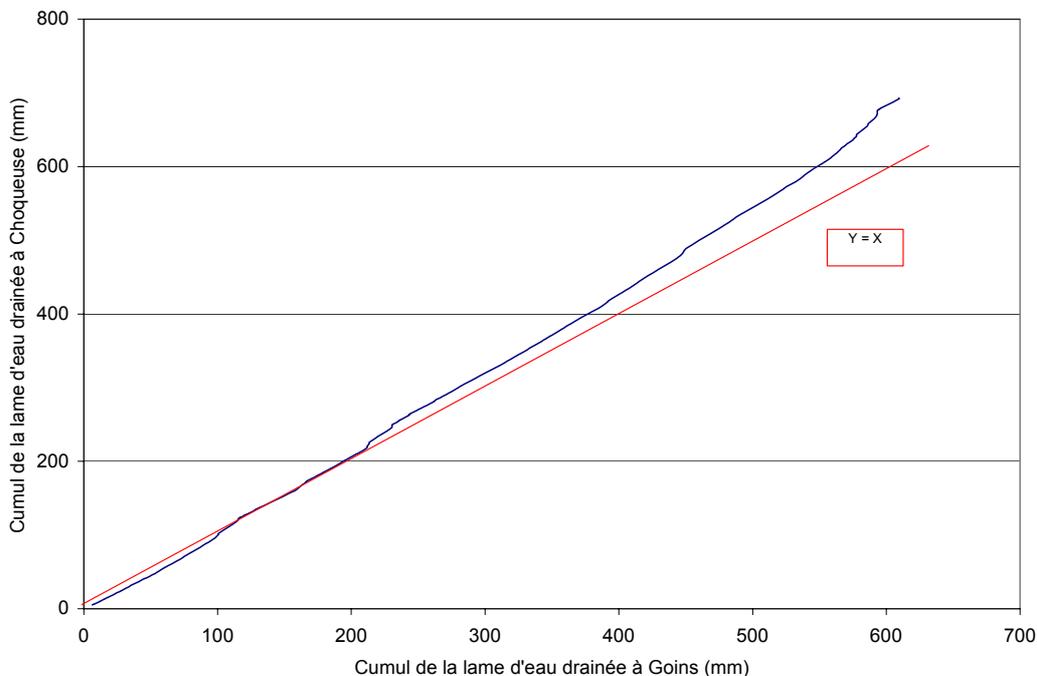


Figure 8 : Doubles cumuls des lames d'eau drainées à Goins et Choqueuse

Sur ce graphique (fig.8), qui s'étend de 1998 à 2001, aucune différence n'est apparente entre les deux sous-bassins. En terme de bilan sur 3 ans, ils drainent à peu près la même lame d'eau, et on ne peut différencier la zone mixte de la zone purement agricole. On remarque cependant une tendance de la zone mixte à exporter plus d'eau que la zone agricole, depuis environ deux ans. Peut-on y voir une conséquence de la tempête de décembre 1999, qui a entraînée la chute d'une partie du couvert forestier et une forte réduction de la surface foliaire du peuplement ? Les mesures des prochaines années nous permettront de voir si cette tendance se maintient ou bien s'efface.

A cette échelle globale, on peut dire qu'il n'y a pas d'impact décelable de la forêt sur les transferts d'eau.

A l'échelle de la saison et de l'évènement, on n'a en revanche pas les mêmes fonctionnements sur les deux bassins. Durant l'hiver hydrologique, le bassin mixte a tendance à exporter autant d'eau que le bassin agricole, comme l'illustre la figure 9.

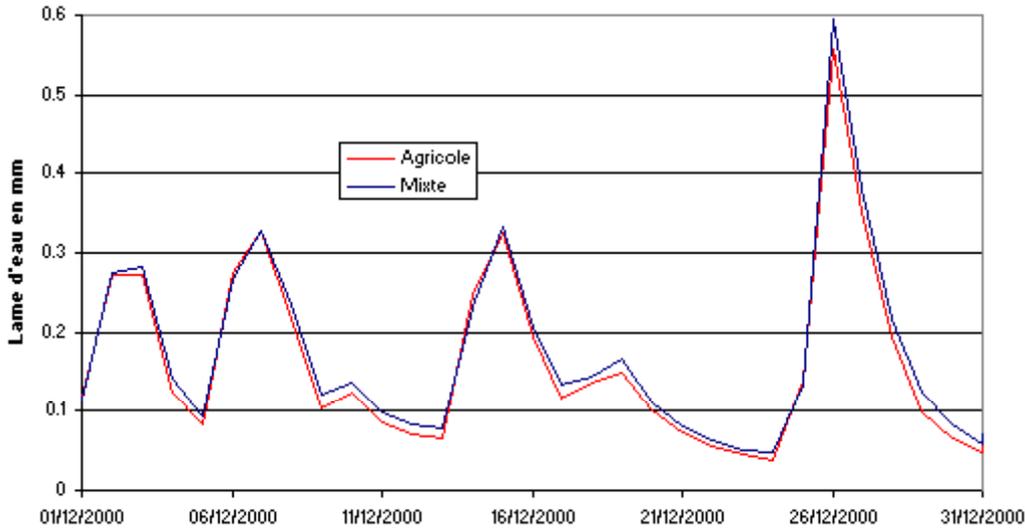


Figure 9 : Comparaison des lames d'eau aux stations de Goins et Choqueuse sur une période d'hiver hydrologique

En revanche, sur une période d'été, ou le sol est plus sec, c'est le bassin agricole qui exporte le plus d'eau (Fig.10). La capacité de rétention du sol en forêt est, sur cette période, à son maximum.

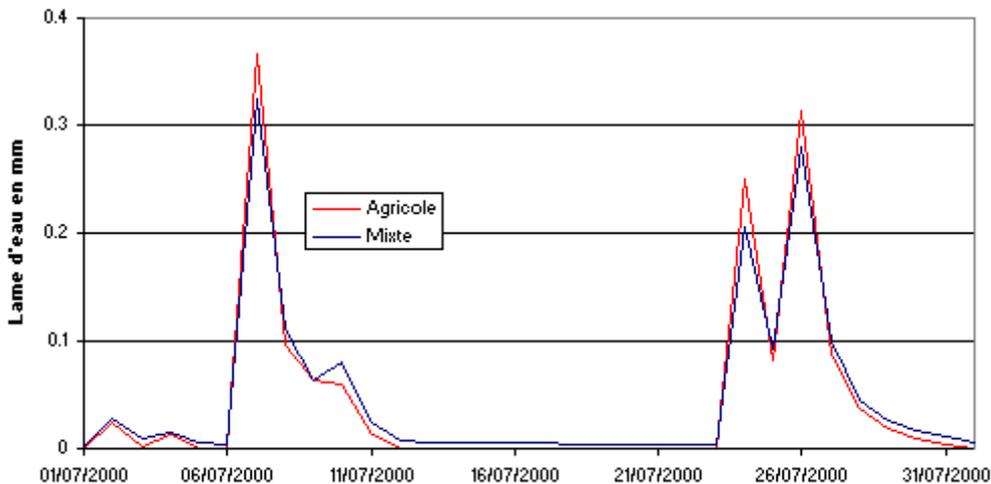


Figure 10 : Comparaison des lames d'eau aux stations de Goins et Choqueuse sur une période d'été

La lame d'eau de Choqueuse redevient supérieure à celle de Goins en fin de décrue, lorsque les nappes superficielles se vidangent.

La zone intermédiaire a une fonction d'écrêtage des crues lorsque le réservoir sol n'est pas saturé. Elle assure également un débit de base à l'étiage.

3.3. Bilan entrée-sortie de la zone intermédiaire et intérêt du suivi piézométrique pour la compréhension de son fonctionnement

Depuis mai 1999, un transect piézométrique est installé en forêt de Choqueuse, perpendiculairement au ru. Les 4 piézomètres sont installés respectivement à 0, 4, 9, et 19 m du ru et sont enfouis à des profondeurs variant entre 1, 10 et 1, 20 m.

Ces piézomètres nous permettent d'étudier les mouvements de la nappe superficielle, afin de les relier aux évolutions de débits dans le ru et à évaluer les échanges nappe-rivière.

Il apparaît qu'en période humide (saison hydrologique, Fig. 11), la nappe et le ru réagissent simultanément. Les temps de réaction de la nappe sont de l'ordre de quelques heures.

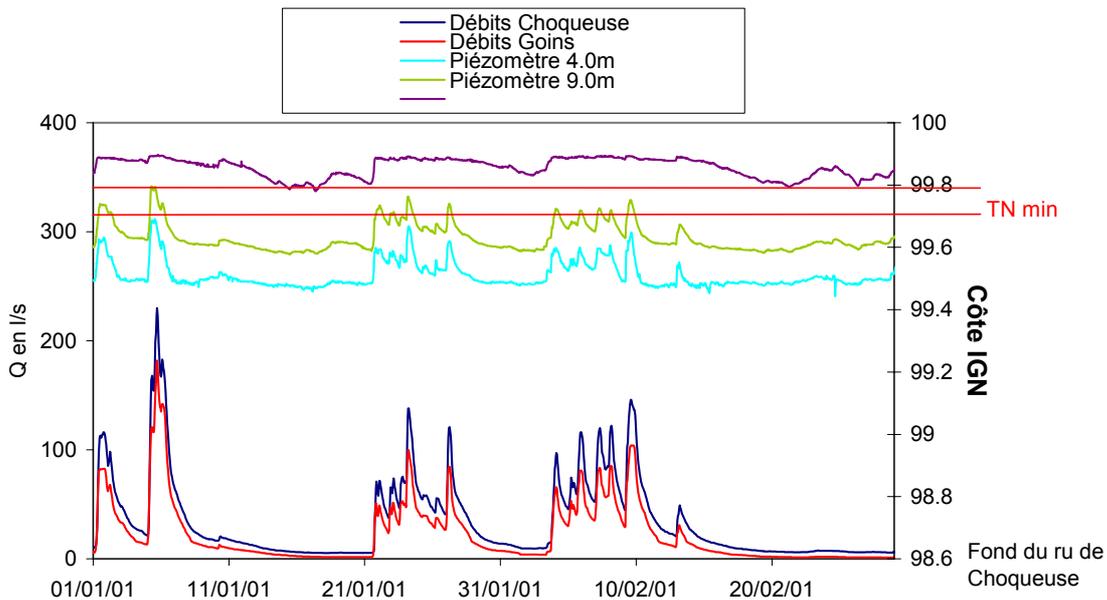


Figure 11 : Comparaison de l'évolution du niveau de la nappe superficielle en forêt de Choqueuse, avec les débits observés à Choqueuse (mixte) et à Goins (agricole) sur une période de drainage intense

La contribution forestière à l'écoulement à Choqueuse et la hauteur de nappe sont maximales sur cette période. Les échanges nappe-rivière sont rapides et importants.

En période d'été, la nappe se vidange, et entretient un débit de base à Choqueuse. Le rapport des différences de débit entre les deux stations n'est plus un simple rapport de surface.

Les temps de réaction de la nappe (recharge puis décharge) sont moins rapides, de l'ordre de quelques jours. Cela entraîne une décrue plus lente à Choqueuse qu'à Goins, ce que l'on avait déjà observé en comparant les lames d'eau sur les deux bassins.

3.4. Validation du fonctionnement de la zone intermédiaire par comparaison à un bassin purement forestier

Le fonctionnement de la zone intermédiaire peut être observé sous deux aspects : un aspect hydrologique, où l'on raisonne sur des valeurs quantitatives, et un aspect qualitatif, où l'on raisonne sur les concentrations et les flux mesurés à chaque station.

On a vu que la capacité de rétention d'eau des sols forestiers est maximale sur la période d'été hydrologique, tandis qu'elle rejoint celle du sol agricole durant la saison d'écoulement intense. La fonction d'écrêtage de crue des sols forestiers n'est donc valide que sur une partie de l'année.

La figure 12 présente les chroniques de débit aux trois stations sur deux périodes hydrologiquement différentes.

On observe que durant la saison de drainage intense, les trois bassins réagissent de façon similaire aux épisodes pluvieux, avec une augmentation de débits proportionnelle à la superficie du bassin. Il semble que la forêt réagisse de la même façon qu'un bassin versant agricole. Les sols sont saturés, et les transferts d'eau sont essentiellement des transferts rapides. On n'observe pas d'écrêtage de crue.

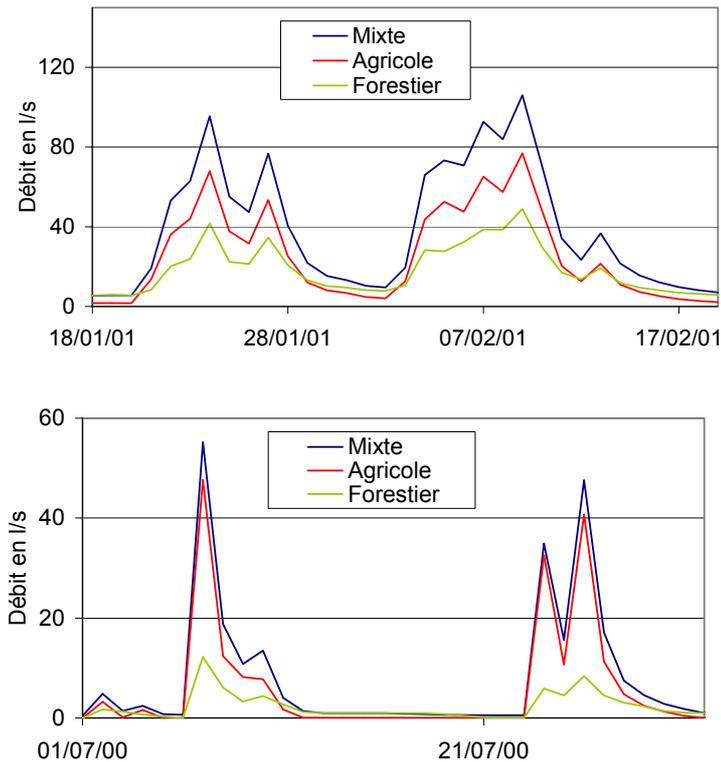


Figure 12 : Comparaison des débits observés sur les trois stations de Goins, Choqueuse et Quatre Cents, sur une période hivernale et une période estivale

En revanche, sur la période estivale, les différences de débits entre les trois bassins ne semblent plus proportionnelles aux superficies. Le bassin mixte (Choqueuse) n'a pas un débit très supérieur à celui du bassin agricole (Goins), et les crues du bassin forestier (Quatre Cents) ne sont pas de la même ampleur que celles observées sur les deux autres bassins. Les pics de crue en forêt sont plats, alors qu'ils sont très pointus sur les bassins agricole et mixte.

Nous avons vu en 2.2.2, que les concentrations de flux de chlore sont similaires quel que soit le bassin versant (forestier, agricole, mixte). Ceci démontre bien qu'il s'agit du fond géochimique. Les notions de transfert rapide ou lent introduites plus haut sont visibles en utilisant les concentrations en chlorure, qui témoignent d'un passage par le compartiment du sol et du sous-sol. Ainsi les concentrations en chlorure permettent aussi de déterminer la part de l'eau de nappe qui alimente le ru. Le chlorure étant un traceur provenant du sol, moins l'eau est concentrée en chlorure moins elle a mis du temps à se transférer dans la couche de sol (transfert rapide). Une eau chargée en chlorure témoignera d'un temps long de contact dans le compartiment du sol.

La figure 13 illustre bien ce phénomène. Nous constatons sur ces graphiques qu'en période de forte contribution de la part forestière (avril, vidange des nappes), les flux de chlorures en sortie de bassin mixte ou forestier, sont nettement supérieurs aux flux en sortie de bassin agricole, alors, qu'au début de l'hiver hydrologique (janvier, recharge des sols), la situation est inverse.

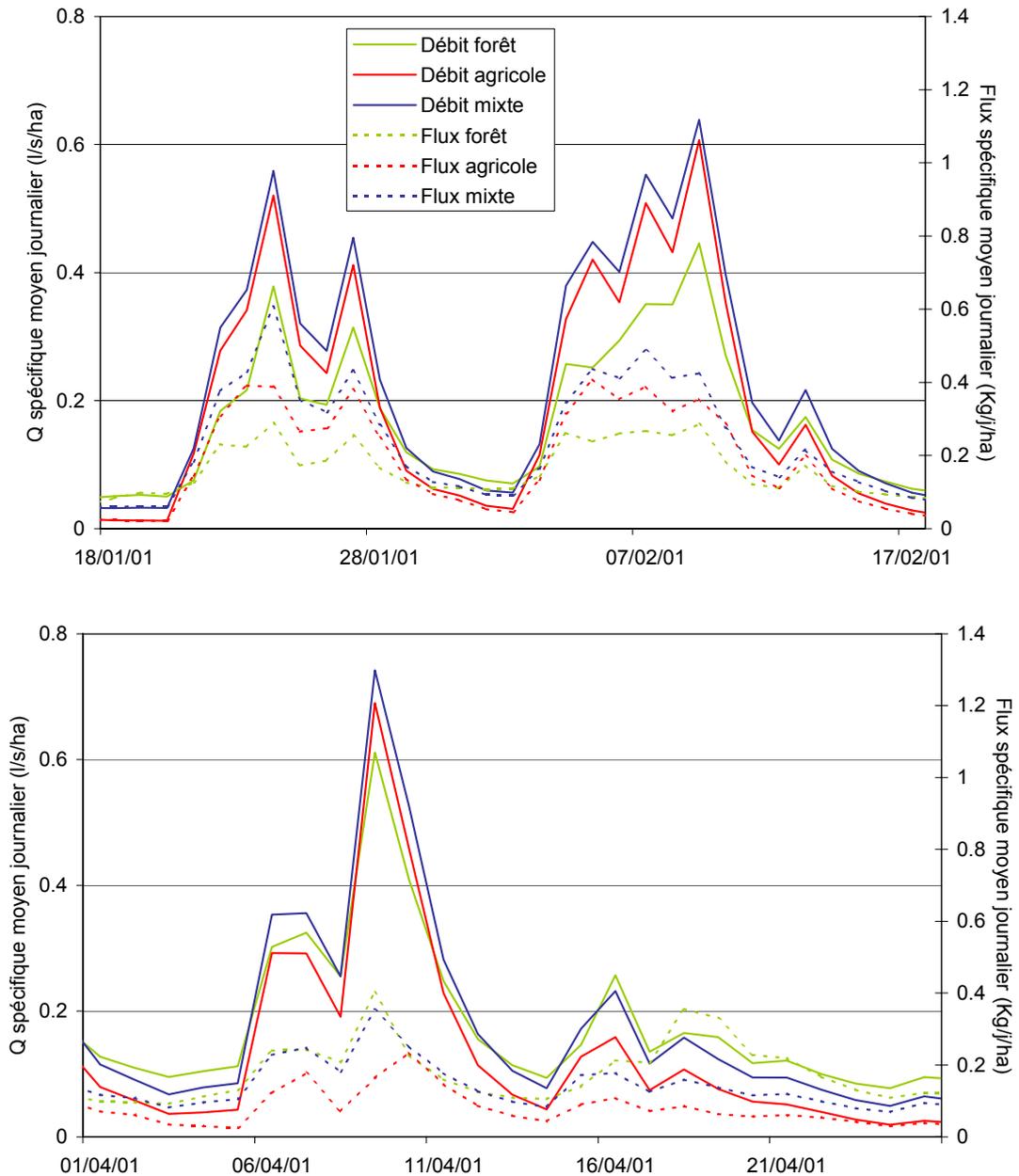


Figure 13 : Comparaison des débits et des flux spécifiques de chlorures des trois bassins versants

Ce temps de séjour de l'eau dans le compartiment du sol est à l'origine du transfert d'azote. La concentration en nitrate de la lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin mixte dépend des contributions hydriques des différents compartiments qui constituent le bassin mixte. La part de l'eau transitant rapidement par ruissellement apportera une eau à la concentration en nitrate de l'eau de pluie. Les apports de la forêt, quel que soit le temps de transfert de l'eau de surface ou de subsurface seront toujours faibles. En revanche les concentrations de l'eau provenant du bassin agricole conditionneront la concentration à l'exutoire du bassin mixte. Dans notre étude, la diminution des concentrations en nitrates ne résulte pas de processus biologiques (dénitrification ou autre) en raison d'un temps de transfert de l'eau dans le réseau trop court et un volume écoulé en crue bien supérieure à la capacité de stockage dans la zone type tampon. La diminution des concentrations est seulement la conséquence de la dilution plus ou moins faible selon les périodes (été, hiver). Augmenter la contribution de la partie forestière (par augmentation de la superficie du complément forestier) dont la teneur en nitrate de l'eau est faible, peut être un moyen de diminuer les concentrations en nitrate (et pas en chlorure) à l'exutoire du bassin mixte.

A ce stade, il est intéressant de noter que les transferts caractérisés comme lent dans le compartiment du sol sous forêt peuvent alors modifier par mélange la concentration à l'exutoire du bassin mixte, parce que le bassin forestier n'exportait pas de nitrate. L'objectif d'une autre méthode compensatrice consisterait à court-circuiter les lames d'eau du bassin agricole pour les faire transiter à travers le compartiment du sol forestier. Un contrôle hydraulique aval (débordement), permettrait le stockage de l'eau de crue de la partie agricole dans la zone forestière, pour un abattement en nitrate. Cependant Dise et Wright, 1995, conseillent de ne pas surestimer la capacité d'absorption d'azote par la forêt. Nadlhofer, 2001, introduit même une idée de seuil d'apport pour lequel la forêt peut effectivement tamponner la qualité de l'eau. Au delà de ce seuil, les prélèvements par la végétation diminuent, jusqu'à une dégénérescence du couvert.

4. Quelles règles de composition du signal hydrochimique d'une zone intermédiaire à l'exutoire d'un bassin versant mixte ?

4.1. Etude sur le comportement mixte

Dans la mesure où notre dispositif expérimental nous permet d'avoir accès aux comportements à la fois d'un bassin mixte et de bassins purement forestier ou agricole, nous avons essayé de reconstituer les flux d'eau et de polluants d'un bassin mixte par combinaisons, linéaires ou non, des flux issus de bassins dits « purs ».

Sur nos trois petits bassins amont (Goins, Choqueuse et Quatre Cents), nous avons vu que les temps de réaction sont très rapides (de l'ordre de l'heure) et très proches, et les saisons hydrologiques identiques. Au pas de temps journalier, sur lequel nous travaillons, les débits des trois bassins sont donc comparables.

Dans l'hypothèse où les transferts d'eau se font d'une façon linéaire entre les bassins, l'hydrologie d'un bassin mixte serait la combinaison des hydrologies d'un bassin agricole et d'un bassin forestier, avec un simple rapport de superficie pour le passage de l'un à l'autre.

Le bassin mixte Choqueuse comprenant 100% du bassin agricole Goins et une part forestière de 400 ha correspondant à 36% du bassin forestier Quatre Cents, peut-on reconstituer ses débits et sa qualité à partir de l'équation linéaire $Mixte = Agricole + 0.36 * Forestier$?

Et si cette relation ne fonctionne pas, quels sont les paramètres obtenus par régression, et ont-ils une signification physique ?

4.2. Peut-on déterminer des règles simples de composition ?

4.2.1 Tentatives de reconstitution de l'écoulement d'un bassin mixte agricole-forestier par combinaison linéaire de l'écoulement de deux bassins « purs »

D'un point de vue purement géographique, le bassin mixte Choqueuse est la combinaison du bassin agricole Goins en totalité et d'un complément forestier.

Une régression linéaire telle que : $Mixte = Agricole + a * Forestier$ nous donne les résultats présentés dans le tableau suivant (Tableau 7) :

$$Mixte = 0.66 * Forestier + Agricole$$

Équ. 1

Valeurs des paramètres	Rapport de Student (Paramètre/Erreur type)	Coefficient de détermination r^2	Erreur type	Critère de Nash sur Q
a = 0.66	110	0.92	0.006	99.4%

Tableau 7 : Résultats de la régression $Mixte = Agricole + a * Forestier$

Le coefficient de détermination et le critère de Nash sur les débits sont très bons. La forte significativité du coefficient affecté à la part forestière prouve le caractère explicatif de l'écoulement « forestier pur » dans la reconstitution de l'écoulement mixte.

Le complément forestier au bassin agricole a une superficie de 40 ha, soit 36% du bassin purement forestier de Quatre Cents. C'est donc un coefficient de 0.36 que l'on s'attendrait à trouver dans l'équation 1. Or, le coefficient obtenu par régression est presque le double. Comment peut-on interpréter cette différence ?

Deux paramètres peuvent être pris en compte :

- Les écoulements dans le bassin forestier étant essentiellement dus à une vidange de nappe superficielle, avec quasiment pas d'écoulement direct, l'hydrologie de ce type de bassin n'est pas forcément linéaire, et il n'est pas étonnant qu'un simple rapport de surface ne permette pas de reconstituer la part forestière des écoulements dans le bassin mixte. En revanche, le bassin agricole étant totalement inclus dans le bassin mixte, et on peut sans risque, lui affecter un coefficient de 1.
- Un problème d'imprécision quant aux contours et à la superficie réelle du bassin forestier peut aussi expliquer une partie du fait que le coefficient trouvé dans l'équation 1 ne soit pas plus proche d'un rapport de surfaces.

L'hydrogramme suivant (Fig. 14), présente la reconstitution des débits sur le bassin mixte, par le biais de l'équation 1.

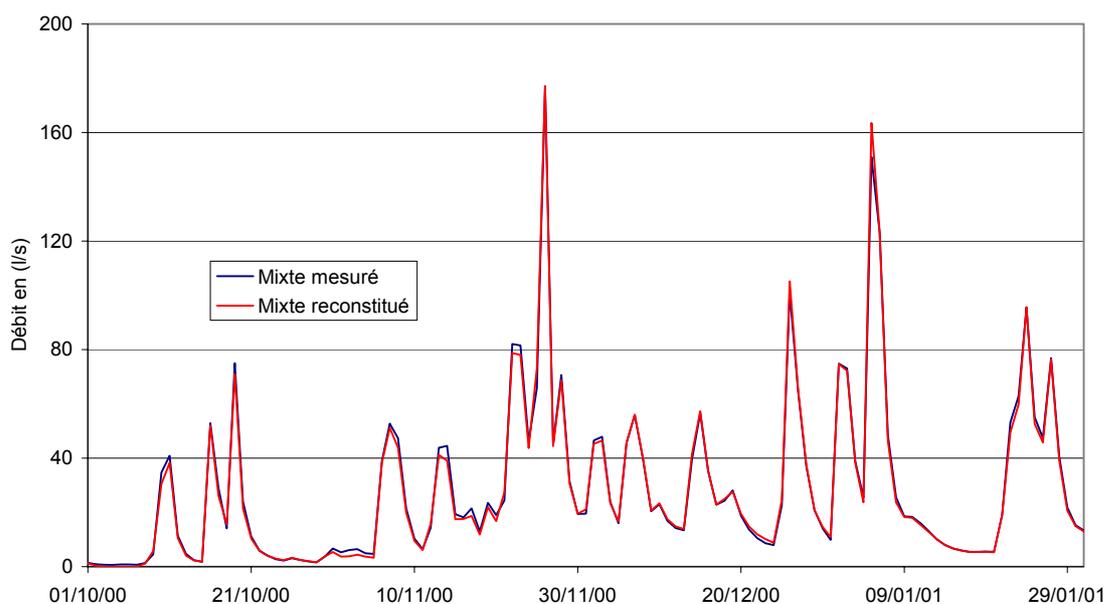


Figure 14 : Reconstitution des débits du BV mixte par combinaison linéaire des bassins agricole et forestier

La reconstitution est très bonne. Deux pics de crue sont cependant légèrement sur-estimés. Sur ces événements, la capacité de rétention de la forêt est probablement plus forte, et le coefficient affecté à la part forestière devrait être plus faible. Si l'on applique la régression sur ces événements précis, on trouve alors un coefficient variant entre 0.50 et 0.60 pour la part forestière. La variabilité spatiale de la pluie peut aussi expliquer la différence sur certains pics de crue (averses très localisées).

Etant donné le fort caractère explicatif de la part forestière dans les débits du bassin mixte, nous avons essayé de reconstituer les débits de celui-ci uniquement avec les débits du bassin forestier, donc, avec une relation du type : $Mixte = b * Forestier$ (avec ou sans constante).

Les résultats obtenus sont les suivants (Tableau 8) :

$$\text{Mixte} = 2.27 * \text{Forestier} + c$$

Équ. 2

Valeurs des paramètres		Rapport de Student (Paramètre/Erreur type)	Coefficient de détermination r^2	Erreur type	Critère de Nash sur Q
Avec constante c	b=2.26	72	0.89	0.03	89%
	c=0.04 (non significatif)	non-significatif (0.11)		0.41	
Sans constante	b=2.27	84	0.89	0.02	89%

Tableau 8 : Résultats de la régression Mixte = a*Forestier

Les critères de Nash sur les débits sont bons, mais tout de même inférieurs de 10% à ceux obtenus avec la régression précédente. La significativité des paramètres b est moins forte, mais encore élevée. La prise en compte d'une constante n'apporte rien de meilleur à la reconstitution (c est négligeable et a une significativité très faible).

L'hydrogramme suivant (Fig. 15) présente la reconstitution des débits du bassin mixte avec les débits forestiers.

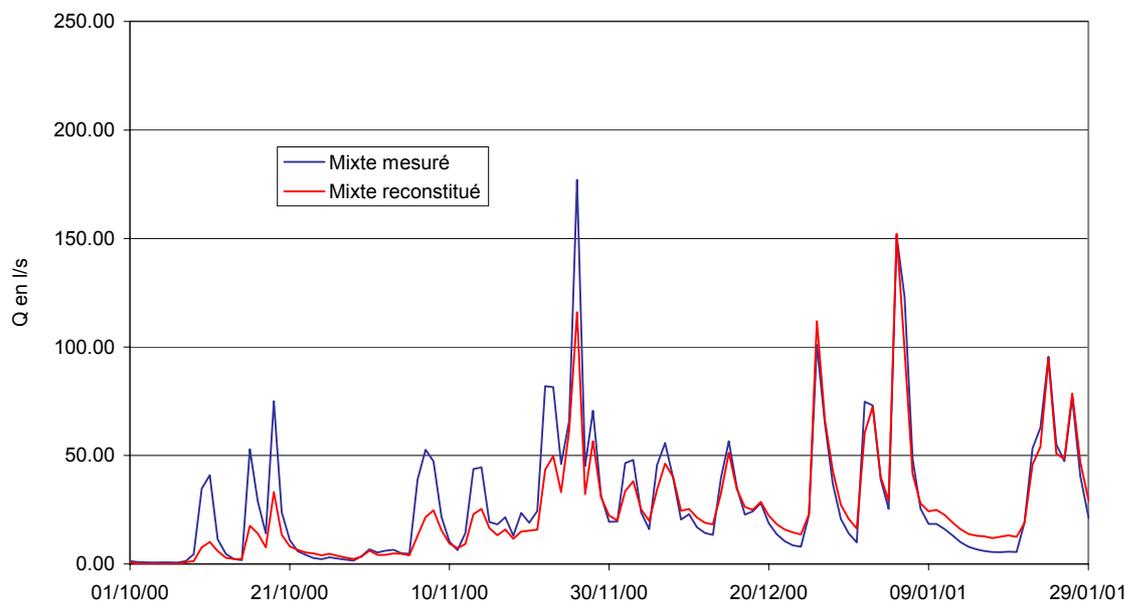


Figure 15 : Reconstitution des débits du BV mixte à partir u bassin forestier

Si les critères de Nash étaient bon globalement, on s'aperçoit que cette relation ne permet pas de reconstituer correctement les événements particuliers. En début d'hiver hydrologique, la reconstitution sous-estime systématiquement les débits sur le bassin mixte. On est alors en pleine période de recharge des sols en forêt, et la contribution à l'écoulement de la partie forestière est très faible. Les débits du bassin mixte sont essentiellement dus à la part agricole. Cette tendance s'inverse progressivement, et vers la mi-décembre, la contribution forestière permet d'expliquer le fonctionnement mixte, ce qui prouve certainement que la différence entre les deux milieux s'est effacée. On observe alors une très bonne reconstitution des crues, mais un nouveau problème apparaît alors. La décrue est mal reconstituée car les apports de nappe sont plus importants sur le bassin purement forestier que sur le bassin mixte, dont la part forestière est plus faible. On ne peut donc pas reconstituer le fonctionnement du bassin mixte uniquement avec un fonctionnement de type forestier.

De la même façon, nous avons tenté de reconstituer les débits du bassin mixte à partir des débits du bassin agricole seulement. Nous avons observé que, même si les corrélations sont bonnes et les critères de Nash également, en début d'hiver hydrologique, les débits du mixte sont cette fois surestimés, et qu'ensuite, les étiages sont sous-estimés.

L'intérêt d'avoir les informations des deux bassins « purs » pour la compréhension du bassin mixte est ici bien visible.

Nous allons maintenant essayer de reconstituer les écoulements d'un bassin d'ordre 3 par combinaisons linéaires de nos trois petits bassins amonts d'ordre 1, agricole, forestier et mixte.

En effet, l'information sur les petits bassins dits « purs » est-elle nécessaire ou utile pour la reconstitution de l'écoulement lorsque l'on passe à une plus grande échelle ?

4.2.2 Tentatives de reconstitution de l'écoulement d'un bassin mixte d'ordre 3 par combinaison linéaire de bassins amonts d'ordre 1

Le bassin d'ordre 3 dont nous tentons de reconstituer l'écoulement est le bassin des Avenelles, d'une superficie de 45.7 km². Nous raisonnerons cette fois, sur les débits spécifiques, en considérant que le débit spécifique du bassin agricole est représentatif de celui des bassins agricoles sur le bassin de l'Orgeval, et que celui du bassin forestier l'est également sur l'Orgeval.

La première combinaison effectuée est de type : $A = a \cdot \text{Agricole} + b \cdot \text{Forestier} + c$, avec $A =$ Débit du bassin d'ordre 3.

Les résultats obtenus par régression sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 9) :

$$A = 0.6 \cdot \text{Agricole} + 0.36 \cdot \text{Forestier} + 0.04 \quad \text{Équ. 3}$$

$$A = 0.54 \cdot \text{Agricole} + 0.63 \cdot \text{Forestier} \quad \text{Équ. 4}$$

Valeurs des paramètres		Rapport de Student (Paramètre/Erreur type)	Coefficient de détermination r ²	Erreur type	Critère de Nash sur Q
Equ. 3	a=0.6	14	0.76	0.04	76%
	b=0.36	5		0.06	
	c=0.04	14		0.003	
Equ. 4	a=0.54	11	0.69	0.05	69%
	b=0.63	9		0.07	

Tableau 9 : Résultats de la régression $A = a \cdot \text{Agricole} + b \cdot \text{Forestier} + c$

Le critère de Nash obtenu avec l'équation 3 est bon, mais on perd 7 points si la constante est considérée comme nulle (équation 4). Alors que sur les petits bassins amonts, nous pouvons considérer les pertes ou apports souterrains comme nuls, sur le bassin versant des Avenelles, cette simplification ne peut pas être faite. Le paramètre c représente des échanges avec la nappe ou avec d'autres systèmes, non pris en compte par les écoulements des petits bassins. Il a une significativité élevée, et ne peut pas être éliminé de la relation.

L'hydrogramme suivant (Fig. 16), présente la reconstitution des débits aux Avenelles à partir des débits de bassins « purs ».

La reconstitution sous-estime les débits sur tout le début de la période d'hiver hydrologique. Vers le milieu du mois de décembre, on observe encore une légère sous-estimation des débits, mais dans des proportions nettement inférieures. Nous avons déjà observé ce type de comportement, lorsque l'on tentait de reconstituer les écoulements du bassin mixte à partir des écoulements du bassin purement forestier. Nous avons attribué cela à une recharge des nappes en forêt. Sur l'ensemble du bassin des Avenelles, il est probable que la rétention d'eau dans les sols a une importance moins forte qu'à l'échelle de nos petits bassins amonts, d'une superficie d'à peine plus de 1 km². En revanche, lorsque les sols sont saturés, la reconstitution est bien meilleure, sauf pour les décrues, qui sont quasiment à chaque fois sous-estimées. Cette observation est également faite, mais dans de plus grandes proportions, avec la reconstitution obtenue avec l'équation 4 (sans constante). Cela tend à prouver que le paramètre c correspond bien à des apports extérieurs, de type échanges avec une nappe profonde.

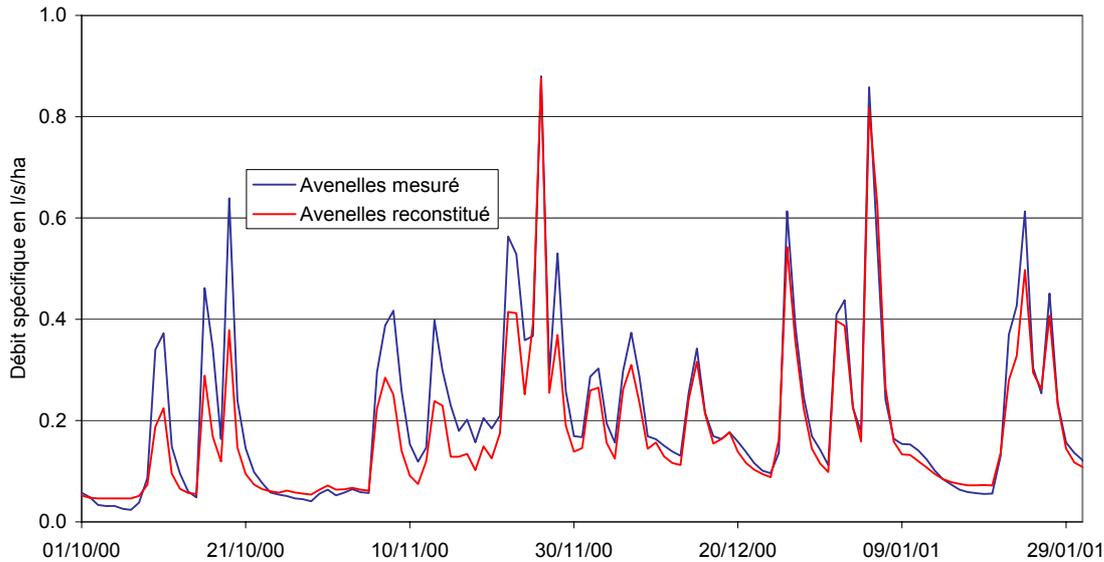


Figure 16 : Reconstitution des débits spécifiques d'un bassin d'ordre 3 à partir des débits spécifiques de bassins d'ordre 1

Nous avons ensuite essayé de reconstituer les débits spécifiques du bassin d'ordre 3, en utilisant uniquement pour chaque test, 1 débit spécifique d'un bassin « pur ».

Les résultats obtenus sont les suivants (Tableau 10) :

$$A = 0.81 * \text{Agricole} + 0.05 \quad \text{Équ. 5}$$

$$A = 1.19 * \text{Forestier} + 0.04 \quad \text{Équ. 6}$$

Valeurs des paramètres		Rapport de Student (Paramètre/Erreur type)	Coefficient de détermination r^2	Erreur type	Critère de Nash sur Q
Equ. 5	a=0.91	44	0.75	0.018	75%
	c=0.05	15.7		0.003	
Equ. 6	b=1.19	37.8	0.69	0.03	69%
	c=0.04	11		0.004	

Tableau 10 : Résultats des régressions $A = a * \text{« Pur »} + b$

La régression qui prend en compte uniquement les débits spécifiques issus d'un bassin agricole semble être la plus efficace. La non prise en compte des débits issus d'un complément forestier est compensée par une augmentation de la constante. Cela n'est pas surprenant, puisque les débits purement forestier correspondent à une vidange de nappe, tout comme les apports représentés par la constante c.

La figure 17 présente les reconstitutions obtenues par les équations 5 et 6.

Dans les deux cas, les crues de début d'hiver hydrologique sont sous-estimées, mais la reconstitution par l'agricole est bien meilleure que celle par le forestier.

Au plein cœur de l'hiver hydrologique, les reconstitutions sont équivalentes, avec cependant une meilleure reconstitution des décrues pour le forestier (l'agricole ne tenant quasiment pas compte d'une vidange de nappe).

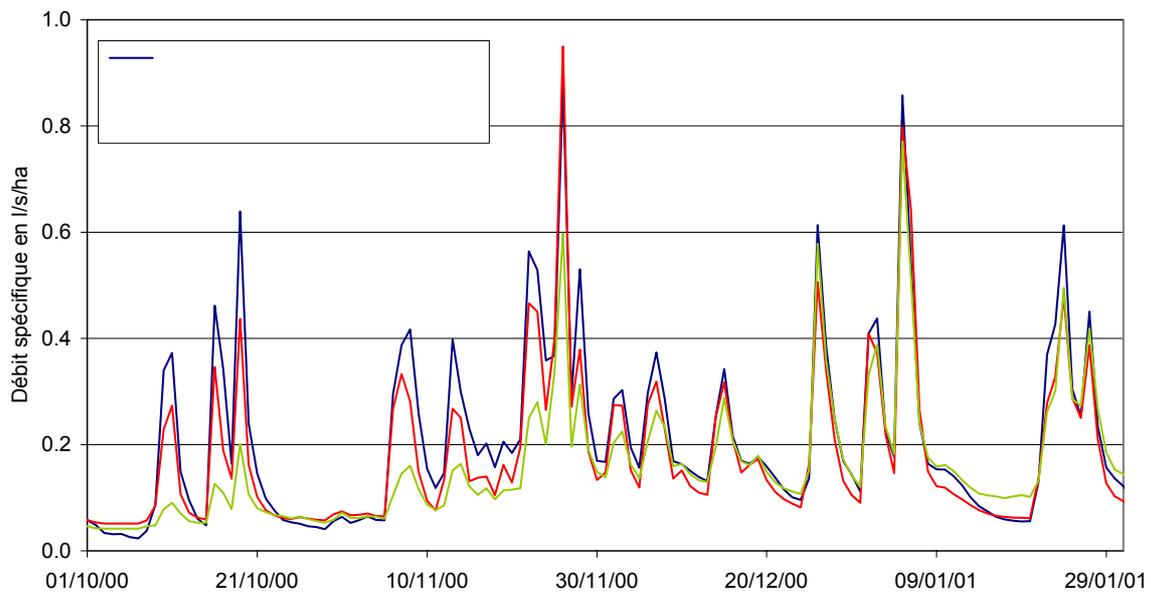


Figure 17 : Comparaison des reconstitutions du débit spécifique des Avenelles par les débits spécifiques de bassins dits « purs »

La meilleure reconstitution semble cependant être celle faite à partir de la combinaison des deux bassins purs (équation 3).

La proportion de forêt sur le bassin des Avenelles étant de 16%, et celle du petit bassin amont mixte (Choqueuse) de 14%, nous avons essayé une nouvelle régression, cette fois à partir des débits spécifique d'un bassin mixte d'ordre 1. Nous pouvons penser que, aux échanges souterrains près, les mêmes types de bassins ont les mêmes type de fonctionnement hydrologiques.

Le tableau 11 présente les résultats obtenus :

$$A = 0.81 * Mixte + 0.04 \quad \text{Équ. 7}$$

Valeurs des paramètres		Rapport de Student (Paramètre/Erreur type)	Coefficient de détermination r ²	Erreur type	Critère de Nash sur Q
Equ. 7	a=0.81	46.5	0.77	0.01	77%
	b=0.04	13		0.003	

Tableau 11 : Résultats de la régression $A = a * Mixte + b$

Les résultats ne sont pas meilleurs que ceux obtenus avec les relations précédentes, et la reconstitution diffère peu de celle obtenue avec la combinaison des deux bassins purs. Il est intéressant de noter que le coefficient 0.81 affecté au bassin mixte dans l'équation 7 est identique à celui affecté au bassin agricole dans l'équation 5. Le seul paramètre qui varie est la constante attribuée aux échanges avec une nappe. Cela n'est pas étonnant, puisque l'on raisonne débit spécifique, et que nous avons vu que les deux bassins drainent presque exactement la même lame d'eau. A cette échelle, les variations saisonnières ou événementielles sont totalement effacées.

Le petit bassin mixte et le bassin forestier sont certainement trop influencés par la capacité de rétention d'eau dans les sols. En revanche, le petit bassin agricole ne l'est pas, et cependant, n'arrive pas correctement à reconstituer les débits du bassin d'ordre 3 en début d'hiver hydrologique. Il est possible que la contribution des échanges avec un autre système sur ce bassin soit sous-estimée, et que son fonctionnement en terme d'écoulement soit donc différent en certaines périodes.

En conclusion, il apparaît que le comportement d'un bassin d'ordre 3 ne peut être obtenu parfaitement à partir du comportement de petits bassins élémentaires d'ordre 1. Le transfert d'échelle semble fortement non-linéaire et il semble qu'il existe au sein du bassin d'ordre 3 des zones contributives qui n'existent pas dans les petits bassins.

4.2.3 Validation de la relation de composition des écoulements d'un bassin mixte par une application aux flux de chlorures

Le chlore étant un élément inerte dans le système qui nous intéresse, on peut penser que la relation, obtenue par combinaison linéaire des écoulements sur les deux bassins « purs » dans le but de reconstituer les écoulements d'un bassin mixte, s'applique également pour la reconstitution de flux de chlorures. On a vu, en 3.1, que les flux de chlorures suivent assez exactement les évolutions des flux d'eau. En appliquant l'équation 1 (Mixte = 0.66*Forestier + Agricole) aux flux de chlorures, on obtient les résultats suivants (tableau 12) :

$$\text{Mixte} - 0.66 * \text{Forestier} = 1.03 * \text{Agricole} \quad \text{Équ. 8}$$

Valeurs des paramètres		Rapport de Student (Paramètre/Erreur type)	Coefficient de détermination r^2	Erreur type	Critère de Nash sur Q
Equ. 8	a=1.03	62	0.84	0.01	89%

Tableau 12 : Résultats de la régression Mixte - 0.66*Forestier = a*Agricole

Aux erreurs de mesures près, la relation Mixte = 0.66*Forestier + Agricole fonctionne bien (a=1.03#1.0). Le graphique de reconstitution des flux sur le bassin mixte présenté ci-après (Fig. 18) montre que mis à part quelques pics de crue, la reconstitution est bonne.

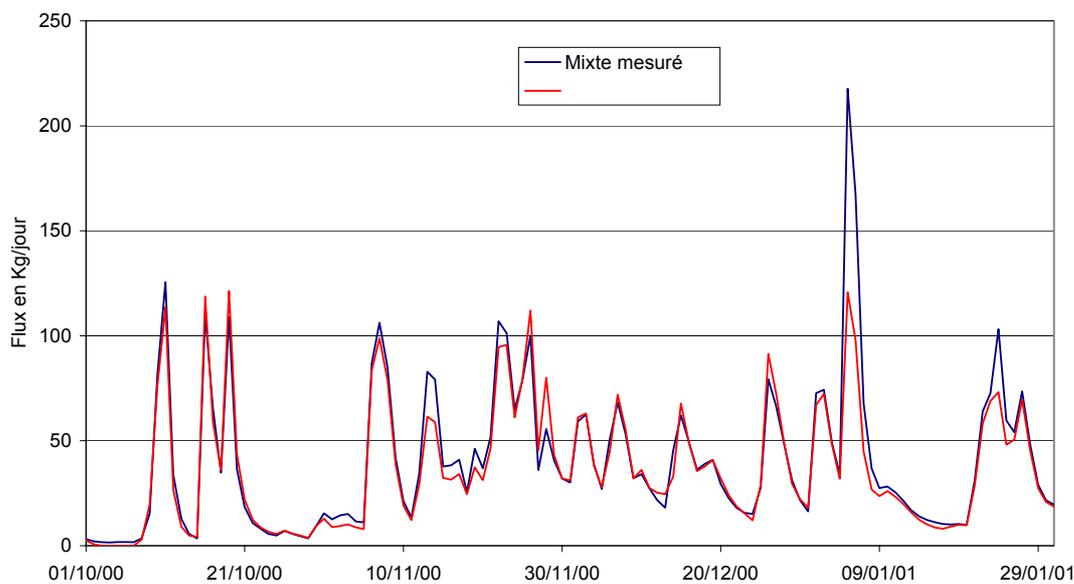


Figure 18 : Reconstitution des flux de chlorures du bassin mixte par combinaison linéaire des flux de chlorures de deux bassins agricole et forestier

La relation obtenue sur les écoulements est bien validée avec les flux de chlorures. On peut estimer que cette relation n'est valable que pour les transferts d'eau et de chlorures (inertes), et que pour les nitrates, dont la diffusion est contrôlée par un cycle de lessivage et d'entraînement d'une durée moyenne de quatre ans, son application est moins évidente.

Les résultats sur les nitrates sont présentés dans le tableau 13.

$$\text{Mixte} - 0.66 * \text{Forestier} = 0.98 * \text{Agricole}$$

$$\text{Équ. 9}$$

Valeurs des paramètres		Coefficient de détermination r^2	Erreur type	Rapport de Student (Paramètre/Erreur type)	Critère de Nash sur Q
Equ. 9	a=0.98	0.86	0.01	64	87%

Tableau 13 : Résultats de la régression Mixte – $0.66 * \text{Forestier} = a * \text{Agricole}$

Le critère de Nash est très bon, et l'on retrouve bien la relation obtenue avec les écoulements.

La reconstitution est également très bonne. Il est cependant difficile de dire que la relation est encore une fois validée, du fait des très faibles valeurs de flux exporté par le bassin forestier. Une relation de type Mixte = Agricole donne des résultats aussi bons.

Dans cette partie, nous avons vu que l'on pouvait expliquer le fonctionnement d'un bassin versant mixte d'ordre 1 par une simple combinaison linéaire de bassins versants « purs » d'ordre 1 également. L'information apportée par les deux bassins est essentielle.

Lorsque l'on passe à l'ordre 3, nous avons vu également que les relations ne sont plus aussi simples, et qu'une relation linéaire n'est peut être pas adaptée. En utilisant les informations apportées par deux systèmes purs, on n'apporte rien de plus qu'en utilisant l'information d'un seul système mixte.

En terme de qualité, nous n'avons pas de données au bassin des Avenelles, ce qui ne nous permet pas de dire si les mêmes règles de composition nous permettraient de prévoir la qualité sur le bassin d'ordre 3.

5. Conclusions et perspectives

A l'issue de 4 années de travail sur les petits bassins versants amonts du Grand Morin, nous avons obtenu des résultats qui permettent de tirer un certain nombre de conclusions et qui suggèrent également des perspectives de poursuite des recherches sur les sites qui ont été équipés :

5.1. Résultats Acquis

5.1.1 Métrologie

La recherche en environnement en général, en hydrologie en particulier, nécessite souvent des suivis de long terme, notamment en raison des difficultés météorologiques. C'est pourquoi nous considérons qu'un résultat important est d'avoir pu étalonner de façon très exhaustive les seuils hydrométriques des stations de Goins, Choqueuse et des Quatre Cents. Les courbes hauteur-débit de ces seuils ont été validées sur l'ensemble de la gamme des débits, et les maxima des débits observés au cours des quatre années ont, fait assez exceptionnel, été jaugés sur les trois seuils³.

5.1.2 Rôle tampon d'une zone forestière située à l'aval d'un bassin agricole

Les recherches menées sur le rôle de rétention d'une zone forestière située à l'aval d'un bassin agricole (système emboîté Goins-Choqueuse) ont permis de mettre en évidence qu'il n'y avait pas d'abattement significatif des flux d'eau, mis à part sur certains événements extrêmes (notamment en été, lorsque les sols ne sont pas saturés) et de nitrates dans la zone forestière aval, mis à part un simple effet de dilution. Nous avons expliqué cela par l'absence d'échanges significatifs entre le ruisseau et le sol forestier, en raison de la rectification (approfondissement) du lit du ruisseau en zone forestière.

5.1.3 Combinaison de comportements purs pour simuler un comportement mixte

Les recherches menées sur la possibilité de reconstituer un comportement mixte (forestier-agricole) à partir de comportements purs (forestier et agricole) ont montré que cette reconstitution était

³ Ces jaugeages ont été effectués lors de la crue du 29 décembre 2001, dont l'ampleur exceptionnelle est due à un événement de pluie sur sol gelé. Le jaugeage est intervenu lors du pic de crue.

possible lorsque l'on restait à l'ordre 1, mais qu'elle devenait plus problématique lorsque l'on sautait de l'ordre 1 à 3.

5.1.4 Comportement hydrochimique d'un bassin forestier

Les mesures effectuées sur le bassin des Quatre Cents ont montré que l'exportation de nitrates de ce bassin était de l'ordre de grandeur de l'apport atmosphérique (et même légèrement inférieur) ce qui semble indiquer une possibilité pour les forêts de servir de tampon.

5.1.5 Comportement hydrochimique comparé de bassins agricoles et forestiers

Les études utilisant les chlorures comme traceurs ont montré la très grande similarité de comportement hydrologique entre les trois bassins étudiés (agricole, forestier et mixte) pour ce qui est de la genèse des flux de chlorures, ce qui indique une possibilité d'utiliser ce traceur comme référence conservative dans des études futures concernant des espèces non-conservatives telles que les nitrates.

5.2. Perspectives

Il existe à notre avis de nombreuses possibilités pour une poursuite des travaux engagés sur les sous-bassins amont de l'Orgeval :

5.2.1 Non linéarité des transferts d'échelle spatiale

L'étude des bassins versants d'ordre 1 à 3, menée dans le but de reconstituer un comportement mixte à partir d'un comportement pur a pu montrer que c'est sans doute à la transition de l'ordre 1 à 2 qu'apparaissent les plus fortes non-linéarités. L'étude de ces non-linéarités est une piste prometteuse. **L'impact de la variabilité climatique sur ces non-linéarités** est un domaine d'étude également prometteur, dans la mesure où nous avons bénéficié d'années hydrologiques très humides en 1999-2000 et 2000-2001 : la stabilité des relations de composition obtenues au cours d'années sèches sera très intéressante à suivre. Dans cette optique, il serait intéressant de pouvoir suivre avec le même dispositif, un bassin versant d'ordre 2 en aval de la forêt de Choqueuse. De même, la station des Avenelles devrait faire l'objet d'un suivi de qualité des eaux en continu.

5.2.2 Rôle tampon d'une zone forestière située à l'aval d'un bassin agricole

Nous avons expliqué l'absence d'échanges significatifs entre le ruisseau et le sol forestier par la rectification du lit du ruisseau en zone forestière. La question qui se pose alors est la suivante : Quel serait l'impact d'un aménagement modifiant l'écoulement du ru de Choqueuse (en réduisant par exemple la débitance du ruisseau pour forcer un débordement) ? Pourrait-on alors restituer à la forêt, un rôle de laminage de crue et de tamponnage des eaux ?

6. Bibliographie

- Arlot, M.P., 1999. Nitrates dans les eaux. Drainage acteur, drainage témoin? Les enseignements d'une approche hydrologique et hydraulique : - Sur l'influence du drainage agricole sur la contamination diffuse des eaux par les nitrates - Sur les possibilités d'utiliser les parcelles drainées pour l'analyse de la dite contamination. Hydrologie, hydrogéologie, géostatistiques et géochimie des eaux., Paris 6 : 373.
- Bélamie, R. and B. Vollat (1986). Etude de la qualité des eaux de drainage. Hydraulique Agricole, 181 p. Cemagref. Antony: 5-44.
- Bleuse, N., 1999. Influence de la forêt sur l'écoulement et la qualité des eaux de deux petits bassins versants ruraux, Mémoire de maîtrise de géographie physique, Université Paris I, 133 p.
- Dise, N.B., Wright, R.F., 1995. Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management*, 71 : 153-161.
- Honisch, M., Hellmeier, C., Weiss, K., 2002. Response of surface and subsurface water quality to land use changes. *Geoderma*, 105 : 277-298.
- Nadelhoffer, K.J., 2001. The Impacts of Nitrogen Deposition on Forest Ecosystems. In "Nitrogen in the Environment : Sources, Problems, and Management." from R.F. Follet and J.L. Hatfield, 520p. 311-331