



HAL
open science

Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe

Pierre Curmi, J Bidois, G. Bourrié, C. Cheverry, P. Durand, Chantal Gascuel, J.-C Germon, V. Hallaire, C. Hénault, Anne Jaffrézic, et al.

► **To cite this version:**

Pierre Curmi, J Bidois, G. Bourrié, C. Cheverry, P. Durand, et al.. Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe. *Étude et Gestion des Sols*, 1997, accepté, pp.95 - 114. hal-02065592

HAL Id: hal-02065592

<https://hal.science/hal-02065592>

Submitted on 21 Mar 2019

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.

Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe

P. Curmi⁽¹⁾, J. Bidois⁽¹⁾, G. Bourrié^(1,2), C. Cheverry^(3, 1), P. Durand⁽¹⁾, C. Gascuel-Oudou⁽¹⁾,
J.-C. Germon⁽⁴⁾, V. Hallaire⁽¹⁾, C. Hénault⁽⁴⁾, A. Jaffrezic⁽¹⁾, P. Mérot⁽¹⁾, F. Trolard⁽¹⁾,
C. Walter^(3, 1), et M. Zida⁽¹⁾

- (1) : INRA, Unité de Science du Sol et de Bioclimatologie, 65 rue de Saint Briec, 35042 Rennes CEDEX.
(2) : Université de Rennes 1 - Géosciences Rennes - UPR 4661 CNRS, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes CEDEX.
(3) : Laboratoire de Science du Sol, département DEERN, ENSAR, 65 rue de Saint Briec, 35042 Rennes CEDEX.
(4) : INRA, CMSE, Laboratoire de Microbiologie des sols, 17 rue Sully, 21034 Dijon CEDEX.

RÉSUMÉ

La qualité des eaux de paysages présentant des sols hydromorphes dépend notamment des modes de circulation de l'eau à travers ces paysages et de l'extension spatiale et temporelle des zones humides en raison de leurs fonctionnements hydrologique et biogéochimique particuliers. L'incidence de ces cheminements sur la teneur en nitrate des eaux superficielles a été analysée par une approche pluridisciplinaire sur un bassin versant de 1200 ha (Coët Dan, Morbihan).

Le modèle d'organisation spatiale des sols correspond à un système pédologique associant un nombre limité d'horizons liés génétiquement. Le moteur de la différenciation pédologique étant l'hydromorphie, qui, sur ce bassin, est contrôlée principalement par la topographie, un modèle prédictif de la distribution des sols hydromorphes combinant deux indices topographiques a pu être établi. Les propriétés hydrodynamiques des horizons de ce système permettent de les regrouper en familles présentant un même comportement. En fonction de ces familles d'horizons et du modèle d'organisation des sols, le bassin versant peut être divisé en deux domaines : un domaine amont, homogène et très perméable où les transferts d'eau et de solutés sont principalement verticaux ; et un domaine aval, multicouche, peu perméable présentant deux niveaux de nappes. Ce dernier domaine est le siège de transferts latéraux dans le sol et d'un ruissellement superficiel dont l'importance est fonction de l'extension spatiale et temporelle des surfaces saturées et de leur connectivité.

L'étude biogéochimique du domaine mal drainé montre l'importance des phénomènes de dénitrification dans la nappe perchée subsuperficielle et l'existence d'un composé du fer (rouille verte) qui peut à certains moments concurrencer la dénitrification. Au plan hydrologique, les variations de la qualité de l'eau au cours de la crue sont bien rendues par la décomposition de l'hydrogramme de crue à partir d'un modèle de mélange à 4 compartiments, cohérent avec le modèle de fonctionnement proposé. Ce modèle montre que l'eau venant de la zone dénitrifiée représente 15 à 30 % de l'écoulement de crue. A l'échelle annuelle, la concentration moyenne en nitrate de différents sous-bassins décroît lorsque la proportion de sols hydromorphes croît. Ces résultats montrent que les zones hydromorphes ont un effet sur les transferts de nitrate, mais que cet effet est limité par l'importance des chemins de l'eau court-circuitant les zones épuratrices. Un modèle conceptuel combinant les transferts d'eau et de nitrate à l'échelle du bassin versant est proposé qui prend en compte les principaux processus identifiés ici.

Mots clés

Système pédologique, horizons, blocs fonctionnels, dénitrification, modèle de mélange, M.N.T., modèle hydrologique topographique, sols hydromorphes, qualité de l'eau.

SUMMARY

ROLE OF SOIL PROPERTIES AND DISTRIBUTION ON WATER PATHWAYS AND WATER QUALITY IN LANDSCAPES WITH HYDROMORPHIC SOILS.

Effects on surface water nitrate level in an armorican catchment.

Water quality in landscapes with hydromorphic soils depend on the space and time extension of wetland areas, on biogeochemical transformations in these areas and on water pathways within the landscape at different scales. The control of nitrate fluxes by these areas was investigated in a detailed study site - the Coët Dan catchment (1200 ha) in Brittany, France (figure 1) - involving various disciplines : pedology, soil physics, hydrology, biogeochemistry and agronomy.

The soil system, which can be described as a spatial arrangement of a limited number of horizon types with genetic relationships, is tightly controlled by topography (figures 2, 3, 4). A predictive model of hydromorphic soil distribution using two topographic indexes was established (figures 5, 6). Regarding to their hydrodynamic properties (K_{sat} , $\gamma(q)$), horizons of the soil system have been classified into « building blocks » (figures 7, 8, 9). According to these building blocks and to the soil distribution model, the catchment is divided in two main domains : a highly permeable homogeneous upslope domain where water and solute transfer are mainly vertical (figure 8a), and a multilayered, poorly drained downslope domain where a shallow perched water table occurs above the groundwater. In the latter domain, lateral flow occurs in the soil (figures 10b, 11) and surface runoff occurs depending on the space and time extension and connectivity of saturated surfaces (figure 10).

Biogeochemistry of the poorly drained domain shows the importance of denitrification and the existence of a green rust that may at times compete with denitrification. A four component mixing model of flood genesis based on chemical data obtained from different parts of the catena and from the river was coherent with the hydrological behaviour of the catchment previously defined (figure 11). This model suggests that water coming from the denitrifying zone account for 15 to 30 % of the stormflow. The mean annual nitrate concentrations at the outlet of the subcatchments is negatively correlated with the percentage of hydromorphic soils (figure 12). These studies reveal that the hydromorphic zones had an effect on the nitrogen transfer in the catchment, but this effect is limited by the importance of water pathways by-passing the buffer zones. A combined conceptual model of water and nitrate transfer at the catchment scale taking into account the main processes hereby identified is proposed (figures 15, 16). The conclusions of this programme have direct outcomes for designing new landscape management options.

Key-words

Soil system, soil horizon, building block, denitrification, mixing model, digital elevation model, TOPMODEL, hydromorphic soils, water quality.

RESUMEN

IMPORTANCIA DEL SUELO SOBRE LA CIRCULACIÓN DE LAS AGUAS EN EL SENO DE PAISAJES QUE COMPORTAN UN SECTOR HIDROMÓRFICO.

La calidad de las aguas de paisajes que comportan suelos hidromórficos depende particularmente de los modelos de circulación del agua a través de estos paisajes, y de la extensión espacial y temporal de las zonas húmedas en razón de sus funcionamientos hidrológicos y biogeoquímicos particulares. La incidencia de estos caminos sobre la tasa en nitrato de las aguas superficiales fue analizada con un enfoque pluridisciplinario sobre una cuenca de 1200 ha (Coët Dan, Morbihan).

El modelo de organización espacial de los suelos corresponde a un sistema pedológico que asocia un numero limitado de horizontes ligados genéticamente. El motor de la diferenciación pedológica siendo el hidromorfismo, que en esta cuenca está controlada principalmente por la topografía, se estableció un modelo predictivo de la distribución de los suelos hidromórficos que combina dos índices topográficos. Las propiedades hidrodinámicas de los horizontes de este sistema permiten agruparlos en familias que presentan un mismo comportamiento. En función de estas familias de horizontes y del modelo de organización de los suelos, la cuenca puede ser dividida en dos dominios: un dominio agua arriba, homogéneo y muy permeable donde las transferencias de agua y de soluciones son principalmente verticales; y un dominio agua abajo, multicapa, poco permeable presentando dos niveles de mantos acuíferos. El último dominio es la sede de transferencias laterales y de escurimiento superficial cuya importancia es función de la extensión espacial y temporal de las superficies saturadas y de su interconexión.

El estudio biogeoquímico del dominio mal drenado muestra la importancia de los fenómenos de denitrificación en el manto freático subsuperficial y la existencia de un compuesto del hierro (herrumbre verde) que puede en ciertos momentos competir con la denitrificación. En el punto de vista hidrológico, las variaciones de la calidad del agua en el transcurso de la crecida están bien muestradas por la descomposición del hidrógrama de crecida a partir de un modelo de mezcla a 4 compartimentos coherente con el modelo de funcionamiento propuesto. Este modelo muestra que el agua que viene de la zona desnitrificada representa 15 a 30 % del flujo de la crecida. A la escala anual, la concentración media en nitrato de las diferentes subcuencas decrece cuando la proporción de suelos hidromórficos crece. Estos resultados muestran que las zonas hidromórficas tienen un efecto sobre las transferencias en nitrato, pero que este efecto está limitado por la importancia de los caminos del agua que evitan las zonas depuradoras. Se propone un modelo conceptual combinando las transferencias de agua y de nitrato a la escala de la cuenca y que toma en cuenta los principales procesos identificados aquí.

Palabras claves

Sistema pedológico, horizontes, bloques funcionales, denitrificación, modelo de mezcla, M.N.T., modelo hidrológico topográfico, suelos hidromórficos, calidad del agua.

Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés dans le cadre de l'Action Incitative Programmée « Valorisation et protection des ressources en eau » de l'INRA. Cet article fait la synthèse de résultats exposés en détail dans l'ouvrage CORMORAN (Cheverry, 1997) et dont certains ont fait l'objet de publications en langue anglaise. On se reportera aux articles de base pour une bibliographie plus étendue sur chaque thème.

INTRODUCTION

Le développement continu de l'agriculture en Bretagne depuis trente ans a permis à cette région de se hisser au premier rang des régions agricoles françaises et européennes. Ce développement, fondé sur l'intensification de l'élevage hors-sol en particulier, conduit localement à un excédent structurel d'azote et à une accumulation de phosphore, de cuivre et de zinc dans les sols. Les conséquences d'une telle évolution sur l'environnement doivent être analysées avec soin, notamment quant à la qualité des eaux superficielles dont la teneur en nitrate s'accroît régulièrement.

Dans ce contexte, un programme multidisciplinaire de caractérisation, d'observation et de modélisation des transferts de masse et d'énergie en milieu agricole intensif - le programme CORMORAN - a été mis en place par l'INRA, en relation avec d'autres organismes (BRGM, CEMAGREF, CNRS, Université de Rennes) en 1991. Un des objectifs de ce programme est de comprendre le rôle du milieu physique sur le cheminement de l'eau et son incidence sur la teneur en nitrate des eaux superficielles (Curmi et al., 1995). On peut espérer alors tester l'efficacité d'un aménagement du paysage ou d'une conduite spatiale raisonnée de l'activité agricole sur l'amélioration de la qualité des eaux.

La démarche scientifique mise en œuvre s'attache à caractériser spatialement les processus, l'échelle privilégiée étant celle d'un bassin versant. L'accent est mis sur le rôle des zones hydromorphes de fonds de vallée et sur les fonctionnements hydrologique et biogéochimique.

Dans une première partie, l'organisation des sols dans le bassin versant et le fonctionnement hydrodynamique de celui-ci seront abordés. Dans une seconde partie, le fonctionnement biogéochimique du domaine hydromorphe et le rôle du cheminement de l'eau sur sa qualité seront discutés. Un modèle conceptuel couplant les approches hydrodynamique et biogéochimique sera enfin proposé.

LE BASSIN VERSANT DU COËT DAN

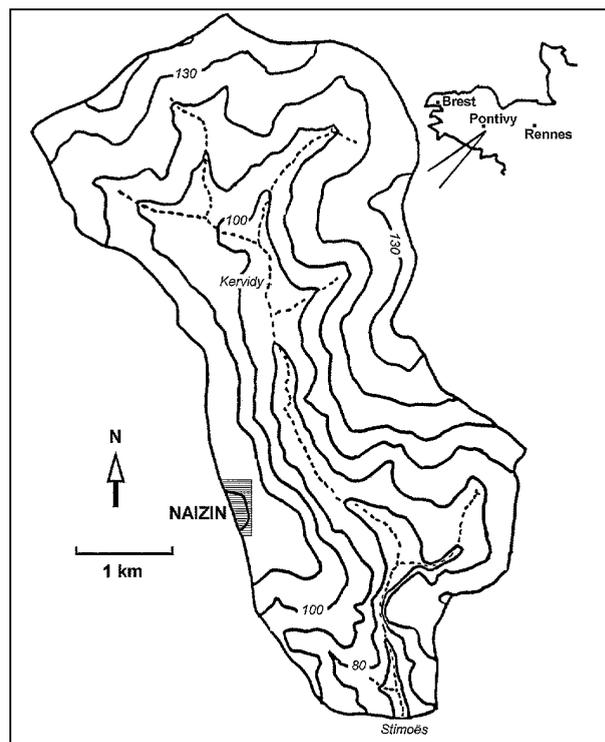
Le bassin du Coët Dan à Naizin (Morbihan), intégré au réseau européen des bassins versants de recherche, a été

choisi en raison de la longue chronique de données, tant quantitatives que qualitatives, acquises par le Cemagref depuis 1978 (Cann, 1990). D'une surface de 12 km² et d'altitude comprise entre 65 et 136 m, il s'inscrit dans le bassin de l'Evel (figure 1). La teneur moyenne annuelle en nitrate des eaux superficielles à l'aval du bassin a été multipliée par 10 en 20 ans (de 1,5 à 15 mg.l⁻¹ N-NO₃⁻). Les bilans réalisés par le Cemagref sur le bassin versant indiquent qu'environ 80 % des excédents agricoles ne se retrouvent pas dans la rivière. Une partie notable du défaut de bilan peut être affectée aux phénomènes de dénitrification.

L'Evel prend sa source en contrebas d'une surface d'altération paléogène (120 - 130 m) présentant des altérites à kaolinite épaisses de plusieurs mètres et un relief peu marqué; le réseau hydrographique s'encaisse ensuite dans les schistes et grès briovériens (Van Vliet-Lanoé et al., 1997). Le bassin versant du Coët Dan se situe dans une position intermédiaire entre la surface d'altération ancienne et l'enfoncement quaternaire de l'Evel. On y distingue le haut bassin à fonds de vallée larges et versants peu pentus - les altérites épaisses se limitant aux fonds de vallée

Figure 1 - Le bassin versant du Coët Dan, localisation et topographie (équidistance des courbes de niveau : 10 m; réseau hydrographique : - -)

Figure 1 - Situation and topographic map of the Coët Dan catchment (contour lines : 10 m; stream network : - -)



- du bassin inférieur, d'altitude inférieure à 110 mètres, où le relief est plus marqué et la roche rapidement saine. Ce bassin présente une couverture limoneuse d'origine éolienne d'épaisseur, faible et variable (comprise entre 0 et 1,5 m).

La pluviométrie inter-annuelle sur 22 ans est de 713 mm (± 125 mm), avec un écoulement de 305 mm (± 168 mm). Les pluies supérieures à 20 mm par jour sont exceptionnelles. Les intensités moyennes horaires sont inférieures à $4 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ dans 80 % des cas (Cann, 1990). La rivière s'assèche généralement en été.

LES MÉTHODES

L'analyse de la couverture pédologique est fondée sur la caractérisation des volumes élémentaires (les horizons) et de leur organisation en systèmes pédologiques, à des échelles allant du 1/100 au 1/5 000 (Curmi, 1993; Widiatmaka, 1994). La carte pédologique de l'ensemble du bassin au 1/10 000 a été levée et sa précision a été quantifiée par différentes méthodes statistiques et géostatistiques (Walter, 1990; Gascuel-Oudou et al., 1994; Walter et al., 1996). Les caractéristiques physiques et hydriques des horizons ont été déterminées in situ ou sur des échantillons à structure conservée : perméabilité en conditions saturées par la méthode des cubes (Bouma et Dekker, 1981), macroporosité fonctionnelle marquée au bleu de méthylène et quantifiée par analyse d'images (Hallaire et Curmi, 1994), courbe caractéristique d'humidité sur table à succion (Stackman et al., 1969). L'évolution du potentiel de l'eau dans le sol est suivie in situ par tensiométrie, particulièrement à l'échelle de l'épisode pluvieux (Grimaldi et Grimaldi, 1996), sur deux stations représentatives des domaines bien drainés et hydromorphes et modélisée en utilisant un modèle mécaniste multicouche (HM-Model) (Taha et Grésillon, 1994).

En hydrologie, les résultats s'appuient sur le traitement des modèles numériques de terrain, sur la modélisation hydrologique spatialisée, notamment par TOPMODEL (Bruneau et al., 1995), sur le suivi des pluies et des débits à l'exutoire de différents sous-bassins et sur le traçage de l'eau. Par ailleurs, la caractérisation de l'état hydrique de la surface des sols du bassin a été effectuée par différentes campagnes au sol de mesure de la teneur en eau pondérale et volumique par gravimétrie et par un suivi à l'aide d'un radar satellitaire (Franks et al., 1997).

En géochimie, des suivis réguliers ont été réalisés sur le réseau hydrographique et dans des sites hydromorphes, associant mesures in situ, prélèvement d'eau du sol en conditions anoxiques et caractérisation biogéochimique des sols et des eaux afin de déterminer une dénitrification potentielle et effective (Henault et Germon, 1995; Parkin et al., 1984). Les déterminations portent sur les éléments majeurs, les formes du fer, le pH, le Eh et les métaux (Cu et Zn).

Légende de la carte pédologique du bassin versant du Coët Dan (carte couleurs 1)

Sols bien drainés

(signes d'hydromorphie au delà de 80 cm) :

G1 : BRUNISOLS de moins de 60 cm de profondeur

G2 : BRUNISOLS ou BRUNISOLS luviques, de 60 à 80 cm

G3 : BRUNISOLS luviques, de plus de 80 cm

Sols peu hydromorphes

(signes d'hydromorphie entre 40 et 80 cm) :

G4 : BRUNISOLS de moins de 60 cm

G5 : BRUNISOLS ou BRUNISOLS luviques, de 60 à 80 cm

G6 : BRUNISOLS luviques de plus de 80 cm

Sols hydromorphes dès la surface :

G7 : BRUNISOLS-RÉDOXISOLS ou BRUNISOLS-RÉDOXISOLS luviques, de 40 à 100 cm de profondeur

G8 : LUVISOLS-RÉDOXISOLS faiblement dégradés

G9 : BRUNISOLS-RÉDOXISOLS luviques sur altérite hydromorphe

G10 : LUVISOLS-RÉDOXISOLS faiblement dégradés sur altérite hydromorphe

G11 : LUVISOLS-RÉDOXISOLS dégradés sur altérite hydromorphe

G12 : RÉDOXISOLS ou RÉDUCTISOLS fluviqes

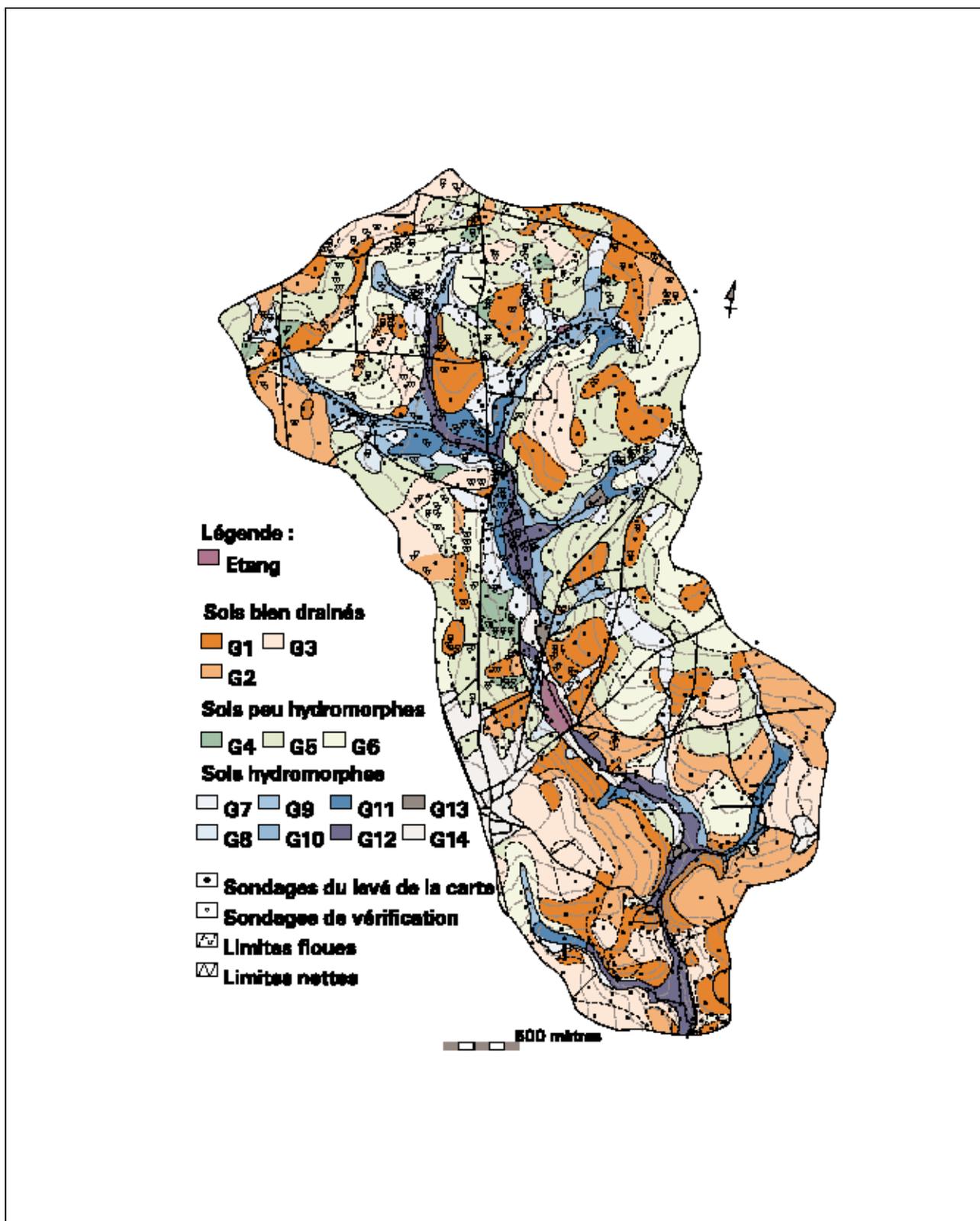
G13 : HISTOSOLS

G14 : Zones remaniées, zones urbaines...

(1) Lorsque ces sols sont mis en valeur, la remontée du pH de 5,0 à 6,5 fait disparaître l'aluminium échangeable du complexe d'échange et conduit à des taux de saturation du complexe plus élevés. On se rapproche alors des caractéristiques des « BRUNISOLS ». Les caractéristiques de structure de l'« ALOCRISOL » correspondant à l'association de structures polyédriques et microgrumeleuses subsistent cependant.

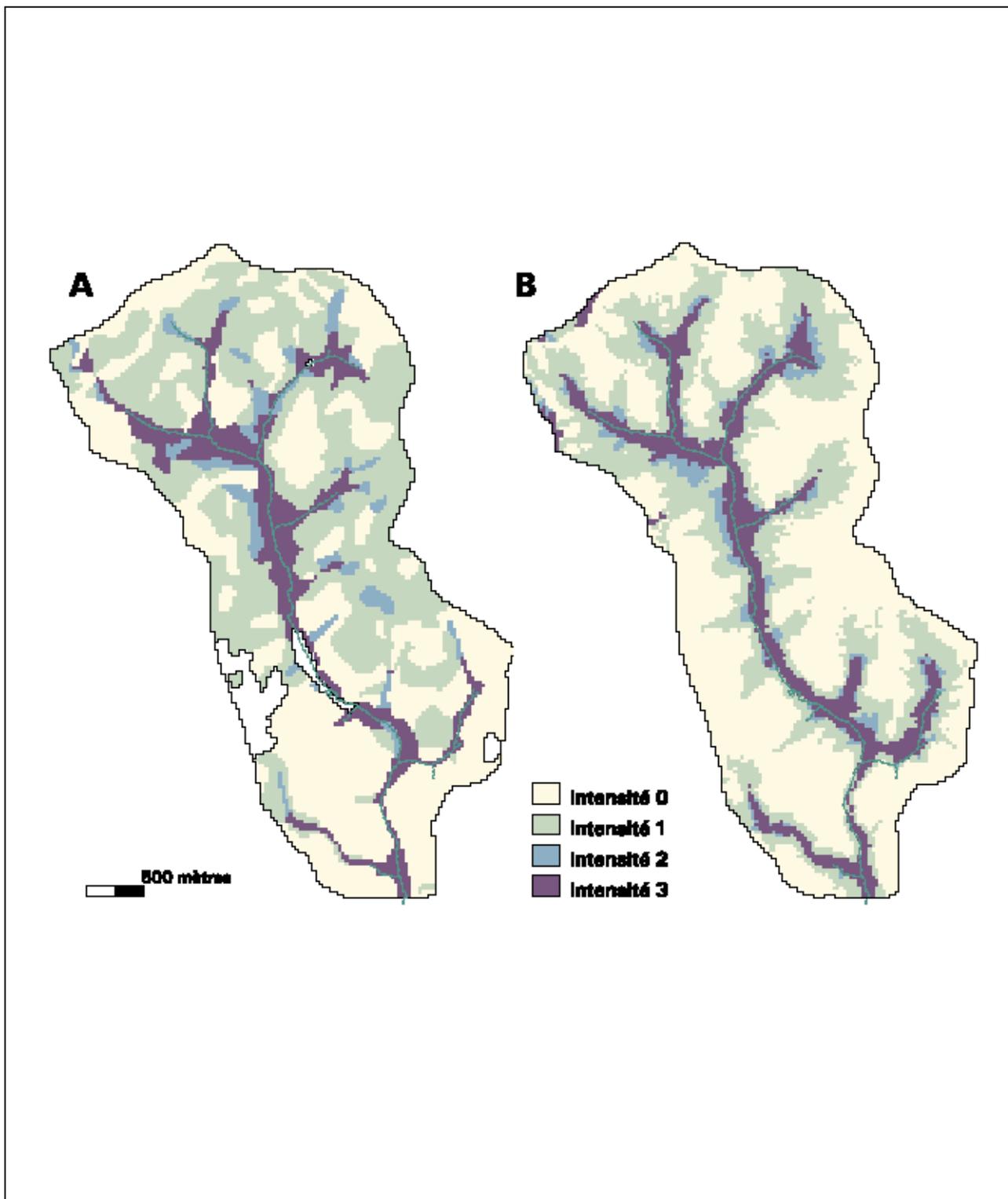
Carte couleurs 1 - Carte pédologique du bassin versant du Coët Dan.

Colors plate 1 - Pedological soil map of the Coët Dan catchment.



Carte couleurs 2 - Comparaison entre l'intensité d'hydromorphie observée sur la carte pédologique (A) et prédite par le modèle topographique (B).

Colors plate 2 - Comparison of hydromorphity intensity observed on the pedological soil map (A) and predicted by the topographical model (B).



Enfin, la caractérisation de l'occupation des sols et des intrants agricoles est le résultat d'enquêtes auprès des exploitants et de levés de terrain.

LE SYSTÈME PÉDOLOGIQUE DANS LA COUVERTURE LIMONEUSE DU MASSIF ARMORICAIN

Identification du système pédologique

Les recherches menées sur le bassin versant et sur l'ensemble du Massif armoricain ces vingt dernières années ont permis d'établir un modèle d'organisation spatiale de la couverture pédologique pour les sols limoneux du Massif armoricain. Il s'agit d'un système pédologique associant 4 types de sols allant d'un pôle bien drainé à un pôle mal drainé (figure 2). Cette association correspond à l'expression de 3 processus : le lessivage d'argile, l'hydromorphie et la

dégradation (appauvrissement en argile et en fer en conditions acide et réductrice) qui conduisent à la différenciation de 7 horizons (Baize et Girard, 1996) dont les caractères et la topologie ont été définis (Curmi, 1993). Cette topologie montre que l'hydromorphie est le moteur de la différenciation. Ainsi, lorsque l'on passe du domaine bien drainé au domaine hydromorphe et dégradé, on note l'apparition successive, de l'amont vers l'aval et à partir de la base de la couverture limoneuse, des horizons marqués par l'hydromorphie (BTg puis Eg), suivis des horizons marqués par la dégradation (BTgd puis Ea) (figure 3). Le segment variant de cette toposéquence à l'échelle cartographique est l'étendue de la transition entre le segment complètement bien drainé à l'amont et le segment complètement hydromorphe et dégradé jusqu'à la surface, en aval. Un trait majeur de cette différenciation pédologique est l'évolution structurale des horizons de subsurface (Sal, E, Eg, Ea), avec le passage d'une structure finement grumeleuse pour l'horizon structural aluminique Sal fortement macroporeux (Aurousseau et al.,

Figure 2 - Les horizons du système pédologique « ALOCRISOL - LUVISOL / LUVISOL RÉDOXISOL - LUVISOL RÉDOXISOL dégradé » dans la couverture limoneuse.

Figure 2 - The pedological horizons of the « ALOCRISOL - LUVISOL / LUVISOL RÉDOXISOL - LUVISOL RÉDOXISOL dégradé » soil system in the silty loam cover.

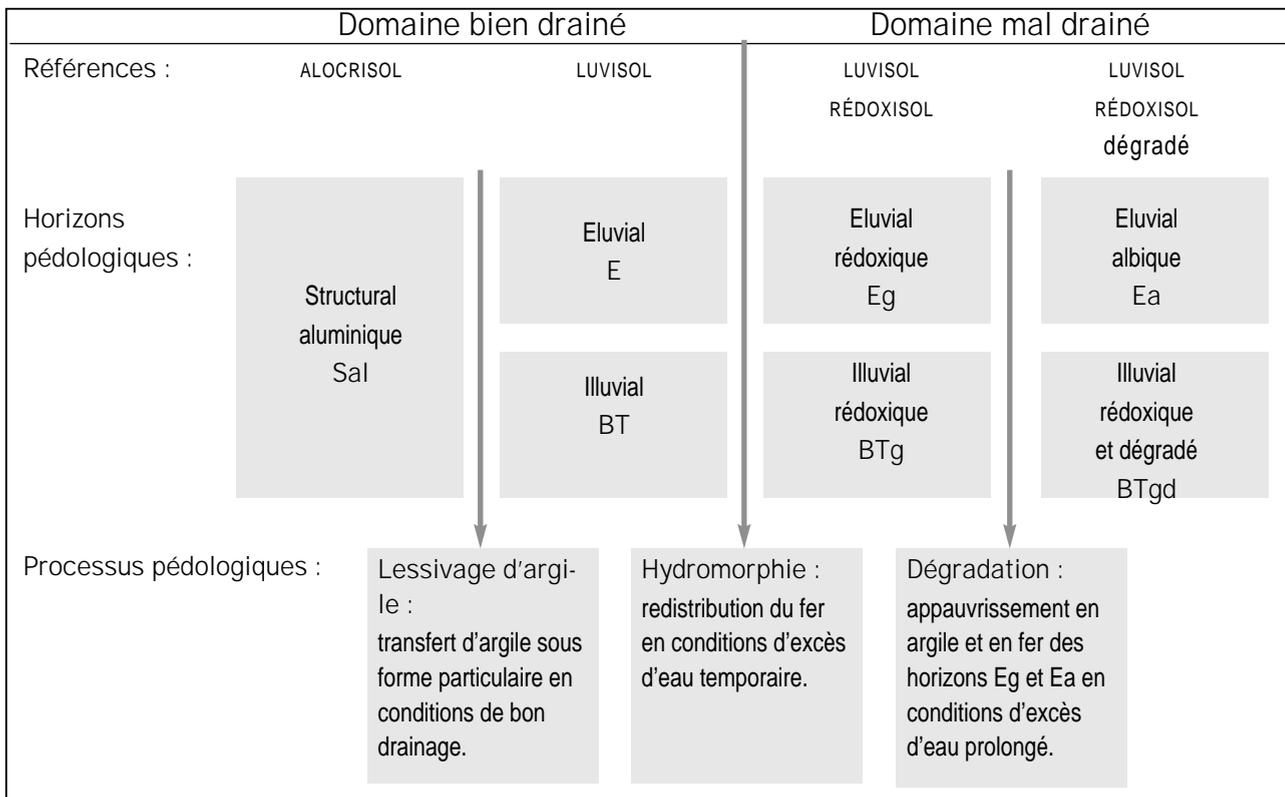
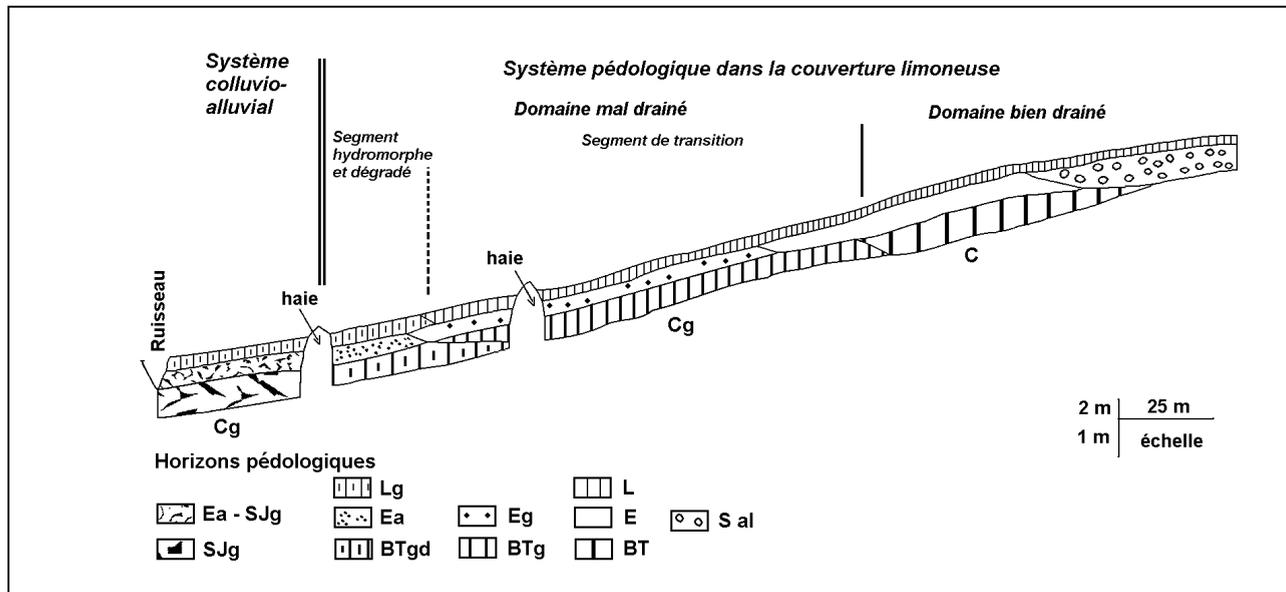


Figure 3 - Organisation des horizons le long d'une toposéquence caractéristique.

Figure 3 - Organization of the horizons along a typical soil catena.



1985) à une structure massive et compacte pour l'horizon éluvial albique Ea (Roussel, 1982), la densité apparente variant de 1,0 à 1,6.

Deux origines de l'hydromorphie ont été reconnues : (i) une origine lithologique, liée aux variations de perméabilité du substrat, qui peut apparaître sur les plateaux ou le long des versants (Curmi et al., 1994; Bourrié et al., 1994) et (ii) une origine topographique liée à la convergence des flux d'eau à l'aval des versants (Mérot et al., 1995b).

La carte pédologique du bassin versant, au 1/10 000 (Walter et al., 1993; Walter et Curmi, 1997) (Carte couleurs 1) illustre la répartition des principaux éléments du système pédologique dans le paysage : le segment bien drainé (en rouge) sur les parties hautes⁽¹⁾, le segment hydromorphe et dégradé (en bleu) dans les parties basses et le segment de transition (en vert), d'extension variable. On distingue aisément le haut bassin où le segment de transition et le segment hydromorphe et dégradé sont plus étendus, du bassin inférieur où domine le segment bien drainé. L'extension de ce segment de transition dépend étroitement de la topographie fine du versant.

La cartographie détaillée de la zone riparienne met en évidence un second type de système, le système « colluvio-alluvial », constitué d'une association de sols hydromorphes et localement de tourbes (Rédoxisols, Réductisols et Histosols) dont la caractérisation doit être poursuivie dans le cadre des recherches sur les zones humides, et les interactions avec l'aval du système précédent, précisées. Sur le bassin versant du Coët Dan et pour ce qui concerne ses propriétés hydrodynamiques, ce système pourra

être assimilé en première approximation au domaine hydromorphe et dégradé du système précédent (dominance en subsurface de matériaux à texture limoneuse, à structure massive et à faible macroporosité).

Modèle topographique de distribution spatiale des sols hydromorphes

Un modèle de prédiction de l'intensité de l'hydromorphie se fondant sur des critères topographiques a été construit à partir de données pédologiques et topographiques acquises sur 15 toposéquences (Thiersault et Rodriguez Lado, 1994; Antoni, 1995). Quatre classes d'intensité d'hydromorphie ont été distinguées (0 = absence; 1 = < 80 cm; 2 = < 40 cm; 3 = dès la surface). Deux indices topographiques ont été pris en compte : (i) l'indice de Beven - Kirkby modifié (log [aire drainée multidirectionnelle/pente par rapport au ruisseau]) (Aurousseau et Squidant, 1996) qui traduit la contribution de l'amont du point d'observation et (ii) le dénivelé par rapport au ruisseau. Nous avons été amenés à prendre en compte ce second indice en constatant que l'humidité de surface en fonction du dénivelé par rapport au ruisseau présentait une décroissance exponentielle dans la zone hydromorphe aval puis restait stable dans le versant (figure 4) (Crave et Gascuel-Odoux, 1997). Cet indice peut être considéré comme un gradient hydraulique dans la zone saturée. Le modèle de prédiction résulte du croisement des données pédologiques et topographiques. A chaque classe d'hydromorphie correspond une gamme de valeurs déterminée des indices topographiques (Walter et Curmi, 1997; Curmi et al., 1997).

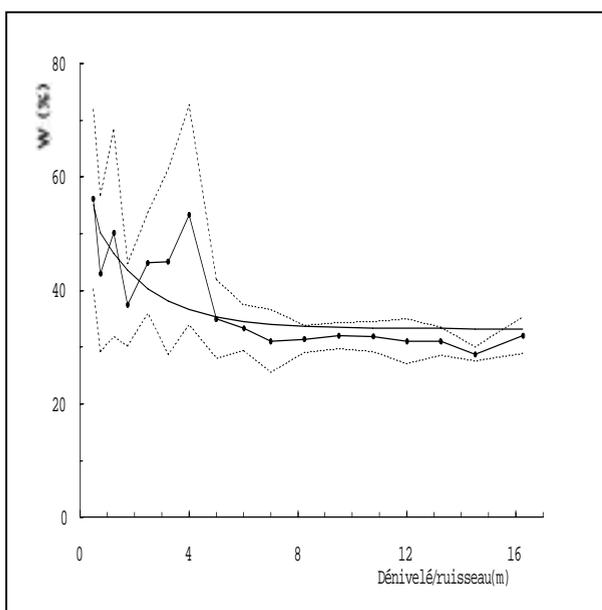
La comparaison de la carte d'hydromorphie estimée par le modèle à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) et de la carte d'hydromorphie déduite de la carte pédologique (Carte couleurs 2) montre une bonne prédiction de l'hydromorphie de bas de versant d'origine topographique. Cette prédiction est sensible à la précision du MNT et à la localisation précise du ruisseau. L'hydromorphie observée sur les hauts de versant, d'origine lithologique, est mal prédite par le modèle en raison de sa propre structure.

LE FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME PÉDOLOGIQUE

Le système pédologique étant établi et la distribution spatiale de l'hydromorphie modélisée, l'étape suivante a été de tester la pertinence de la stratification pédologique par rapport au fonctionnement hydrodynamique. Dans un premier temps, les horizons du système pédologique ont été regroupés sur une base fonctionnelle (Bouma, 1989; Bruand, 1990). Puis, le rôle de l'arrangement spatial des horizons sur ce fonctionnement a

Figure 4 - Teneur en eau pondérale en fonction du dénivelé par rapport au ruisseau. Valeur moyenne (—●—), écart type (- - -), courbe d'ajustement exponentielle (—); observations du 27 janvier 1993 (5 - 10 cm).

Figure 4 - Water content versus elevation range from the stream. Mean water content (—●—), standard deviation (- - -) and exponential regression curve (—); 27 January 1993 (5 - 10 cm).



été déterminé in situ et par modélisation. Enfin, l'extension spatiale et temporelle des surfaces saturées a été caractérisée.

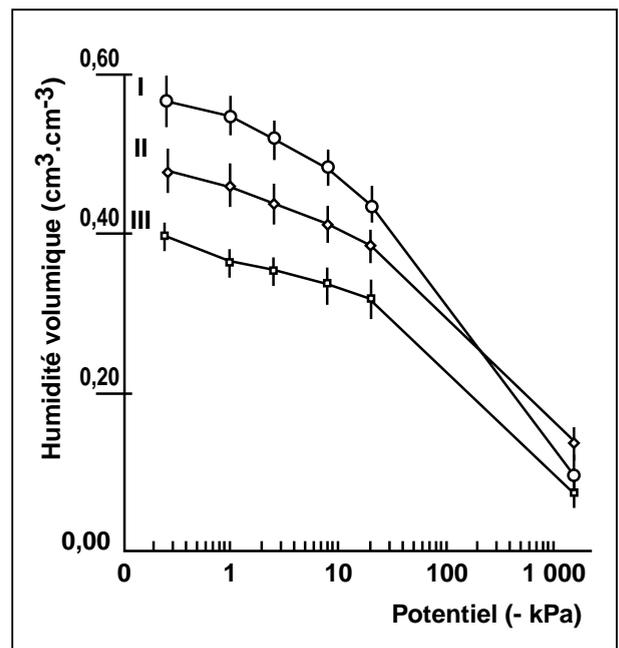
Propriétés hydrodynamiques des horizons du système pédologique

Courbes de rétention d'eau

Les courbes de rétention en eau obtenues pour les différents horizons peuvent être séparées en trois groupes par des techniques statistiques de comparaison de moyennes et d'analyses factorielles discriminantes. Chaque groupe de courbes présente une forme spécifique et peut être caractérisé par une courbe moyenne et une dispersion (figure 5) (Widiatmaka et Curmi, 1994). Ces regroupements sont confirmés à l'échelle du bassin versant (Walter et al., 1996). Ils traduisent bien la structure de ces horizons : (i) finement grumeleuse pour l'horizon structural aluminique Sal dont les propriétés de rétention d'eau à faible succion sont élevées (groupe I); (ii) massive pour l'horizon éluvial albique dont les propriétés de rétention d'eau entre pF 1 et 3 sont très faibles (groupe III).

Figure 5 - Courbes de rétention en eau des trois groupes d'horizons : (I) horizons Sal et E; (II) horizons Eg, BT, BTg et BTgd; (III) horizon Ea. Valeurs moyennes et intervalles de confiance ($t_{0,95}$).

Figure 5 - Water retention curves of the three building blocks : (I) Sal and E horizons; (II) Eg, BT, BTg, and BTgd horizons; (III) Ea horizon. For each potential, mean and confidence interval ($t_{0,95}$) of the water contents.



Ces courbes caractéristiques d'humidité permettent de prédire spatialement des paramètres capacitifs (teneur en eau à un potentiel donné, réserve en eau) à partir de la carte des sols (Walter et al., 1996).

Conductivité hydraulique à saturation

Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation des différents horizons suivent une loi de distribution log-normale classique. Lorsque l'on regroupe ces valeurs selon la nature des horizons, les horizons du domaine bien drainé présentent un K_{sat} plus élevé que celui du domaine mal drainé (figure 6).

Pour analyser plus finement les relations avec les horizons et les déterminants structuraux de K_{sat} , les corrélations entre ce paramètre et la macroporosité ont été analysées (Hallaire et al., 1997). Il n'y a pas de relation entre K_{sat} et la macroporosité totale (figure 7a) tandis qu'une relation se dessine entre K_{sat} et la macroporosité fonctionnelle identifiée par marquage au bleu de méthylène (figure 7b). En prenant en compte la morphologie de la macroporosité fonctionnelle (pores d'assemblage, tubulaires ou fissuraux) et le degré de connectivité des pores, la liaison entre K_{sat} et le type d'horizon est alors plus forte et bien expliquée par le degré de connectivité des pores (figure 7c) : pour un type donné, la conductivité est d'autant plus forte que les pores sont connectés entre eux.

Rôle de l'arrangement des horizons sur le fonctionnement du système

Évolution du potentiel de l'eau, à l'échelle de l'averse

L'évolution du potentiel total de l'eau au cours de l'averse, en début de période hivernale, illustre le comportement spécifique des différentes parties du système pédologique (Zida et al., 1996). Dans le domaine bien drainé, on enregistre une décroissance du potentiel total

Figure 6 - Conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) des horizons des domaines bien drainé et mal drainé du système pédologique.

Figure 6 - Saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) of the well drained and poorly drained horizons of the pedological system.

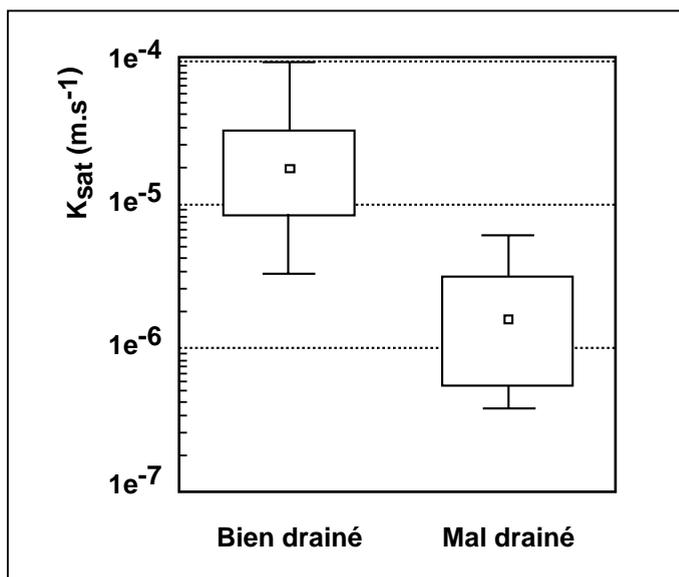
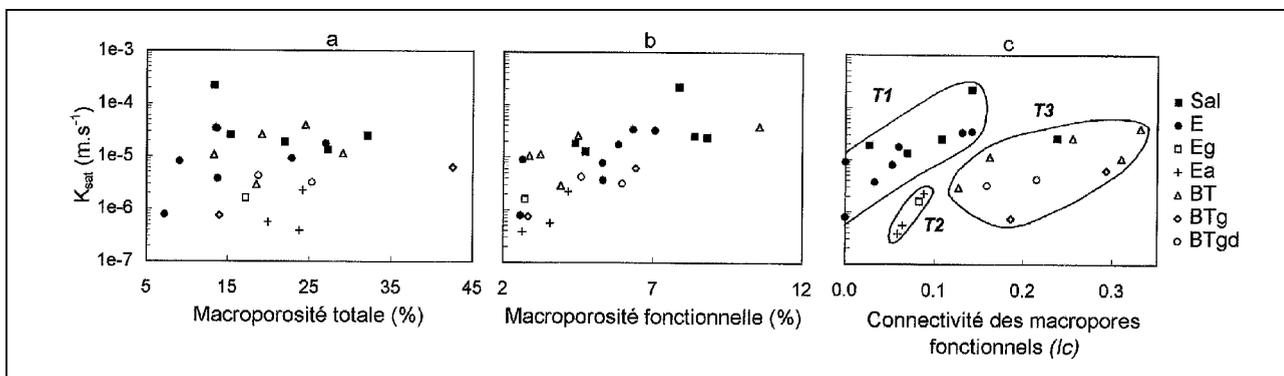


Figure 7 - Relation entre la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et la macroporosité totale (a) ou fonctionnelle (b) et entre K_{sat} et l'indice de connectivité des macropores fonctionnels selon leur type morphologique (T1 : assemblage ; T2 : tubulaire ; T3 : fissural) (c).

Figure 7 - Saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) versus total (a) or effective (b) macroporosity and versus connectivity index of effective macropores according to their morphology (T1 : packing ; T2 : tubular ; T3 : planes) (c).



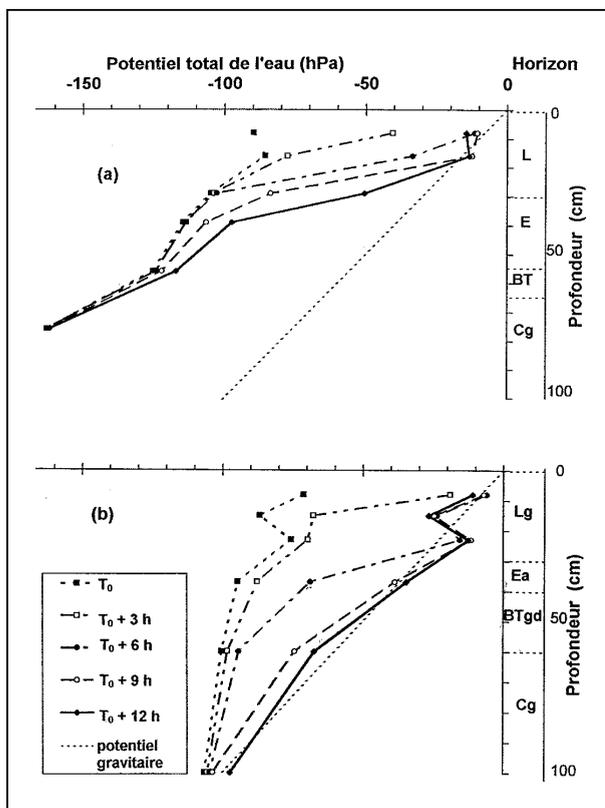
de l'eau avec la profondeur, le sol demeure généralement non saturé sur tout le profil indiquant un drainage essentiellement vertical (figure 8a). Dans le domaine hydromorphe et dégradé, la nappe est présente à la base des horizons B et dans l'altérité dès le début de l'averse : une nappe perchée, localisée au dessus de l'horizon éluvial albique Ea, apparaît au cours de l'averse (figure 8b) et persiste plusieurs heures après l'averse. L'existence de ces deux nappes apparaît comme une conséquence de la géométrie du système, où s'ordonnent spatialement des volumes aux caractéristiques hydrodynamiques contrastées.

Modèle mécaniste multicouche de fonctionnement du domaine aval

L'application du modèle mécaniste multicouche (HM-Model) (Taha et Grébillon, 1994; Curmi et al., 1997), prenant en compte les valeurs de conductivité des horizons, simule bien l'apparition de cette nappe perchée au cours de l'averse. Il per-

Figure 8 - Évolution du potentiel de l'eau du sol à l'échelle de l'averse dans le domaine bien drainé (a) et dans le domaine hydromorphe et dégradé (b), (29-30 septembre 1995).

Figure 8 - Soil water potential variations during a shower in the well drained domain (a) and in the hydromorphic and degraded domain (b), (september 29-30, 1995).



met de plus d'estimer la participation de ces deux nappes à l'écoulement de crue, montrant la contribution de la nappe perchée au pic de crue par circulation latérale au dessus de l'horizon éluvial albique Ea (figure 9).

Extension spatiale et temporelle des surfaces saturées

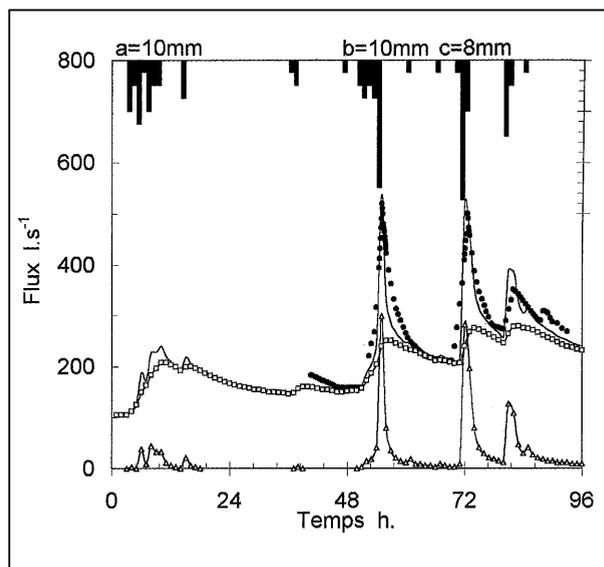
En climat tempéré océanique, sur les versants, le ruissellement superficiel reste localisé dans l'espace et dans le temps (Cros-Cayot, 1996). Ce sont les surfaces saturées à l'aval des versants qui, pour l'essentiel, contribuent à l'écoulement rapide de crue (concept de zone contributive, Beven et Kirkby, 1979; Mérot, 1988). La prédiction de l'extension spatiale et temporelle des surfaces saturées à partir d'un modèle hydrologique fondé sur ce concept (TOPMODEL) a été comparée à l'observation de terrain (Gascuel-Oudoux et al., 1996) et aux données radar satellitaires (ERS1).

Le modèle hydrologique simule bien la surface relative des sols saturés. Une bonne relation est observée entre la durée relative de saturation prédite par le modèle et l'intensité de l'hydromorphie déduite de la carte pédologique.

Trois états de saturation croissants d'une surface d'une

Figure 9 - Contribution simulée par le modèle mécaniste multi-couche de la nappe perchée (³) et de la nappe profonde (⁶) à l'hydrogramme de crue (-), (hydrogramme observé le 4-7 janvier 1994, sous-bassin de Kervidy : •).

Figure 9 - Simulated contribution by application of the HM-model of the perched water table (³) and the deep groundwater (⁶) to the total hydrograph (-), (observed hydrograph January 4-7, 1994, Kervidy subcatchment : •).



centaine d'hectares sont représentés sur la figure 10. Le modèle simule spatialement l'accroissement de la saturation par une seule tache qui s'étend (figure 10a). Sur le terrain, on observe au contraire des taches de saturation indépendantes qui se connectent progressivement (figure 10b), montrant que la continuité des chemins de l'eau s'accroît avec l'état de saturation du bassin. La prédiction spatiale par le modèle est meilleure aux forts états de saturation.

La variation temporelle du signal radar permet de distinguer les zones saturées dont l'état de saturation reste stable, des versants bien drainés qui se ressuient (Franks et al., 1997). La connaissance de l'extension des surfaces saturées à un moment donné permet de contraindre le modèle hydrologique sur ce paramètre et d'en améliorer ainsi la prédiction.

Ces premiers résultats permettent de proposer un modèle conceptuel de fonctionnement du bassin versant où l'on distinguera un domaine amont bien drainé, présentant des transferts essentiellement verticaux d'un domaine aval mal drainé, stratifié, présentant 2 nappes et des écoulements latéraux pendant les épisodes pluvieux. Le ruissellement superficiel dans ce second domaine sera fonction de l'extension et de la connexité des surfaces saturées qui varient en fonction de l'état de saturation du bassin versant.

LE FONCTIONNEMENT BIOGEOCHIMIQUE DES ZONES HUMIDES

Le système pédologique ne se caractérise pas seulement par ses propriétés hydrodynamiques mais aussi par la nature et la réactivité de ses constituants qui, associées aux régimes hydriques, vont influencer sur la qualité de l'eau. Vis-à-vis de la dénitrification, les formes solides du fer, la teneur en carbone organique et le régime hydrique auront une influence (Trolard et al., 1995; Jaffrezic, 1997).

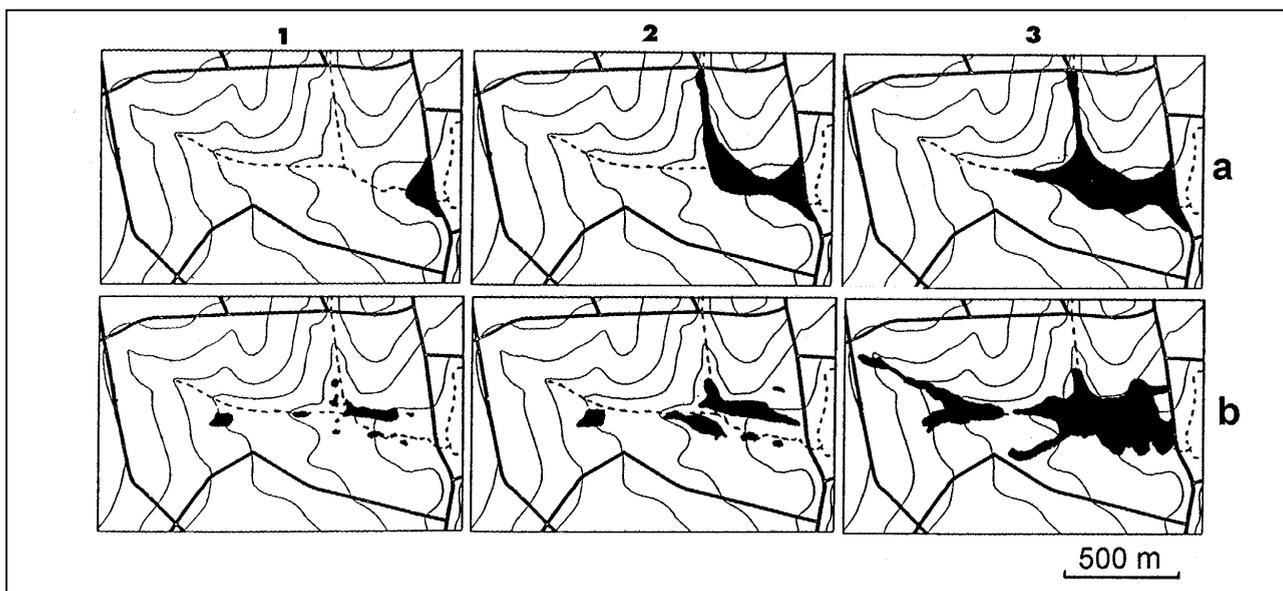
Formes solides du fer

Le fer peut être utilisé comme marqueur géochimique des zones potentiellement dénitrifiantes car : (i) comme l'azote, il est sensible aux variations du potentiel d'oxydo-réduction dans le milieu; (ii) n'ayant pas de cycle atmosphérique, le fer ne peut s'exprimer que dans les phases solides et liquides plus facilement échantillonnables.

Dans une grande variété de situations pédologiques, en climat tropical comme en climat tempéré, le fer en solution est contrôlé par l'équilibre avec des oxydes mixtes Fe (II)/Fe (III) (Ponnamperuma, 1972; Maître, 1991; Bourrié et Maître, 1994). Ces oxydes mixtes sont aujourd'hui identifiés à des minéraux de type Rouilles Vertes (Trolard et al., 1996, 1997). On montre,

Figure 10 - Localisation et forme des surfaces saturées prédites par le modèle hydrologique (a) et mesurées sur le terrain (b) pour trois états hydriques croissants du bassin versant (1, 2, 3), (surfaces saturées : taches noires; réseau hydrographique : - - -; routes : -; courbes de niveau : 5 m).

Figure 10 - Localisation and shape of saturated surfaces predicted by the hydrological model (a) and observed (b) for three saturation stages of the catchment (1, 2, 3), (saturated surfaces : black spots; stream network : - - -; roads : -; contour lines : 5 m).



en outre, que le domaine de stabilité d'une rouille verte hydroxylée a un seuil de réduction compatible avec celui de la première étape de la dénitrification, i.e. $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ (Trolard et al., 1995). Des études au laboratoire montrent que les rouilles vertes peuvent agir de façon abiotique sur les processus de dénitrification (Hansen et al., 1996). Dans le milieu naturel, Jaffrezic (1997) observe que la rouille verte hydroxylée peut entrer en concurrence avec le processus de dénitrification dans les sols hydromorphes.

Capacité dénitrifiante de la couche labourée

L'activité dénitrifiante de la couche labourée à l'amont et à l'aval du système pédologique a été mesurée *in vitro*, sur des échantillons non remaniés issus de 2 toposéquences (Rismondo, 1993; Trolard et al., 1995) selon le protocole défini par Hénault (1993) : (i) aux conditions de teneur en eau et de teneur en nitrate au moment du prélèvement, permettant d'estimer une vitesse effective de dénitrification et (ii) en conditions de saturation en eau et de teneur en nitrate non limitante, donnant une vitesse potentielle de dénitrification.

Les vitesses potentielles de dénitrification mesurées sur des échantillons de sols non remaniés sont très élevées (10 à 40 $\text{kg N. ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$), très supérieures à celles observées en conditions comparables sur des sols d'autres régions françaises (Hénault, 1993), et atteignent des valeurs comparables à celles obtenues sur des échantillons de sols remaniés placés en anaérobiose complète (Bijay-Singh et al., 1989). Les flux de CO_2 mesurés attestent d'une présence suffisante de carbone assimilable et d'une microflore adaptée. Les vitesses effectives de dénitrification sont beaucoup plus faibles (0,02 à 0,9 $\text{kg N. ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$). Dans une majorité des cas ceci est à relier à de faibles teneurs en nitrate; dans d'autres cas, l'absence de conditions physico-chimiques favorables (taux de saturation en eau, présence de rouille verte) semble déterminante.

INFLUENCE DU CHEMINEMENT DE L'EAU SUR SA QUALITÉ

La quantité de nitrate apparaissant souvent limitante, la fourniture en nitrate des sites potentiellement épurateurs en fonction des cheminements de l'eau sera déterminante. Vis-à-vis de ces cheminements, les épisodes de crues ont été distingués des périodes hors crues.

Épisodes de crues

Décomposition chimique de l'hydrogramme de crue

La décomposition de l'hydrogramme de crue a été réalisée à partir de l'analyse de 7 paramètres chimiques au cours de la

crue (nitrate, chlorure, silice, magnésium, alcalinité, ^{18}O et sulfate) et de la mesure de ces mêmes paramètres dans les différents compartiments d'eau libre du sol reconnus par les approches pédologiques et hydrologiques précédentes.

Les événements averses/crues étudiés montrent que quatre types d'eau contribuent significativement à l'écoulement de crue : le ruissellement stricto sensu, la nappe perchée au-dessus de l'horizon éluvial albique Ea, la nappe des horizons B et de l'altérite de la zone de fond de vallée et un écoulement de versant court-circuitant la zone hydromorphe. Les proportions de ces diverses composantes varient grandement pendant l'événement et d'un événement à l'autre, mais en moyenne, les contributions de ces 4 compartiments sont sensiblement égales, mais non simultanées (Durand et Juan Torres, 1996; Mérot et al., 1995a) (figure 11) : (I) le ruissellement et (II) les eaux dénitrifiées de la nappe perchée interviennent en début et au moment du pic de crue; (III) les eaux de la zone cultivée de versant interviennent plutôt dans la deuxième moitié de la crue; (IV) les eaux de la nappe des horizons B et de l'altérite interviennent en début et fin de crue et leur contribution diminue en valeur absolue pendant la montée de crue. Les deux dernières composantes ont une concentration en nitrate plus forte que les deux autres : la dilution observée en crue est due, à parts sensiblement égales, à l'eau de pluie et à l'eau dénitrifiée. L'importance relative de chaque composante varie d'une crue à l'autre en fonction de l'état hydrique du bassin. La nappe perchée dénitrifiée contribue pour un maximum de 30 % à l'écoulement de crue, ce maximum étant atteint lors de crues intervenant lorsque le bassin versant est en conditions humides. Lors de crues de printemps ou d'automne, avec des conditions initiales plus sèches, les parts relatives du ruissellement direct et de l'écoulement de subsurface dans les versants augmentent.

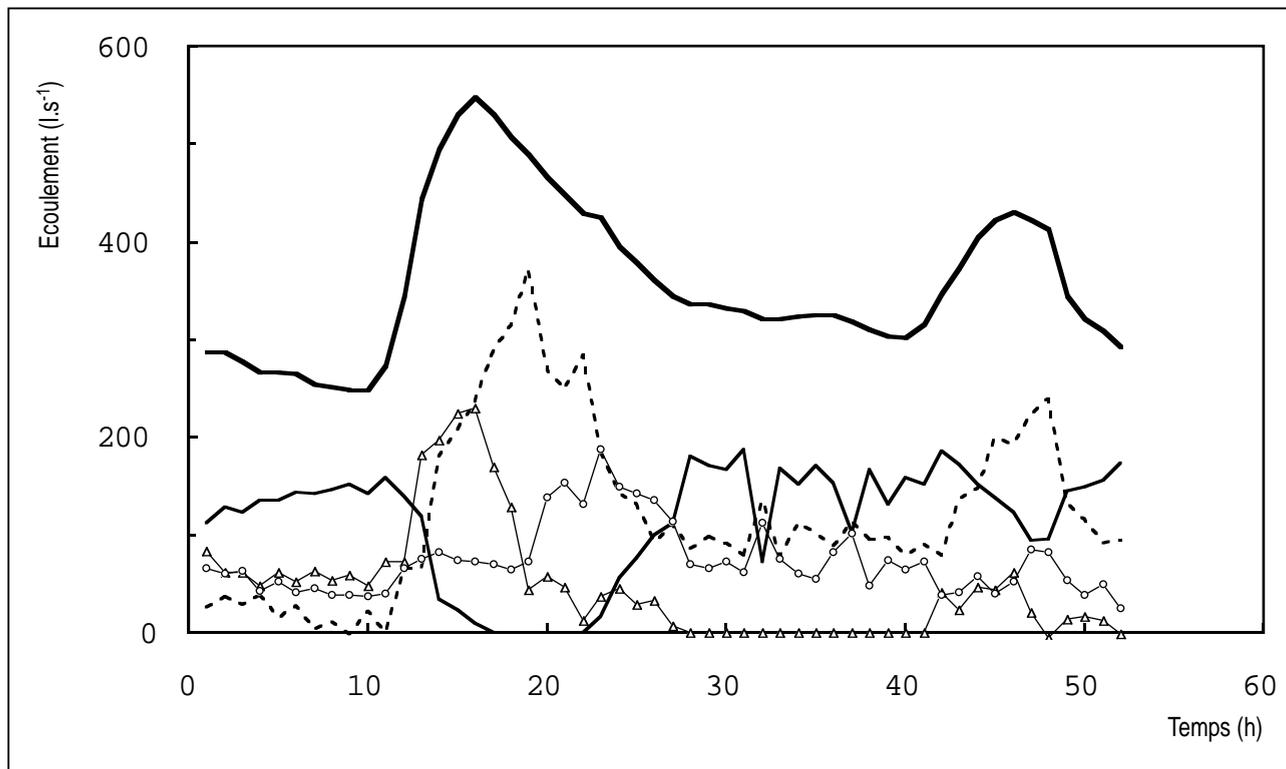
En période hors crues

Approche spatiale du rôle épurateur des zones humides

La qualité des eaux à l'exutoire des principaux sous-bassins du bassin versant du Coët Dan a été suivie selon un pas de temps bimensuel pendant deux ans. Afin d'expliquer les variations importantes de teneur et de flux en nitrate observées aux différents exutoires, celles-ci ont été comparées aux caractéristiques géomorphologiques, pédologiques et aux pratiques agricoles de chaque sous-bassin (Mimault, 1993; Burri, 1994).

Les variations de teneur en nitrate ne semblent pas liées à la géomorphologie des sous-bassins (pente moyenne, forme et longueur des versants,...). Les excédents azotés liés aux pratiques agricoles, calculés selon la méthode bascule (Benoit, 1992), présentent de fortes variations entre les sous-bassins, variations qui, elles non plus, ne semblent pas liées aux variations de teneur en nitrate à l'exutoire.

Figure 11 - Décomposition chimique de l'hydrogramme de crue à partir d'un modèle de mélange à 4 pôles (hydrogramme total : — ; nappe profonde : — ; ruissellement : ³ ; nappe perchée : - - - ; eaux de la zone cultivée : o), (sous-bassin de Kervidy, 5-6 janvier 1994).
 Figure 11 - Hydrograph separation obtained by application of a four endmember mixing model (total flow = — ; groundwater = — ; overland flow = ³ ; perched aquifer = - - - ; cultivated zone water = o, (Kervidy subcatchment, January 5-6 1994).



La couverture pédologique de chaque sous-bassin se distingue par la surface relative de sols hydromorphes. Cette surface relative, très variable pour les petits sous-bassins, se stabilise autour de 20 % pour les sous-bassins de taille supérieure à 200 ha. La concentration en nitrate apparaît décroître en fonction de cette surface relative de sols hydromorphes (figure 12). La concentration en chlorures suit la même tendance de façon plus atténuée. Cela montre le rôle de la zone hydromorphe sur la qualité de l'eau à l'exutoire. La baisse des concentrations en chlorures suggère que le contrôle de la zone hydromorphe sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant doit contribuer à la baisse des concentrations en nitrate. Cependant, celle-ci doit être principalement attribuée à l'épuration biologique (absorption par les plantes et dénitrification) pour les trois raisons suivantes : (i) le rapport des concentrations $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ décroît lorsque la proportion de sols hydromorphes croît ; (ii) les variations des concentrations en NO_3^- et en Cl^- ne sont pas synchrones, les concentrations en Cl^- sont maximales à la fin du printemps tandis que les concentrations en NO_3^- sont

maximales en février ; (iii) la relation entre les concentrations en nitrate et en chlorures présente un effet d'échelle, ces dernières étant corrélées pour les bassins versants de taille supérieure à 2 km² et indépendantes pour les petits bassins versants (Mérot et Durand, 1995).

Il semblerait que les eaux de l'aquifère fissural, dénitrifiées en profondeur en raison de la présence de pyrite et d'une faible quantité de carbone organique (Pauwels, 1996), ne contribuent que peu à l'écoulement de base, sauf, peut-être, tout à fait à l'aval du bassin versant en période de basses eaux estivales.

MODÈLE CONCEPTUEL DE TRANSFERT DE NITRATE DANS LE BASSIN VERSANT

Pour tester le schéma de fonctionnement du bassin versant tel qu'il se dégage des approches pédologiques, hydrologiques et biogéochimiques, un modèle conceptuel simple a été élaboré (figure 13). Ce modèle n'a pas pour ambition de

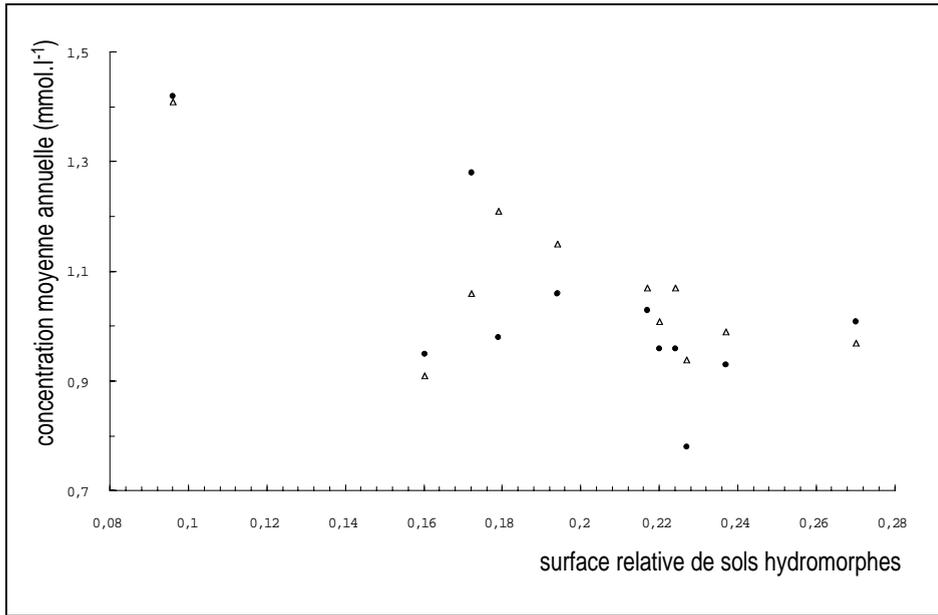
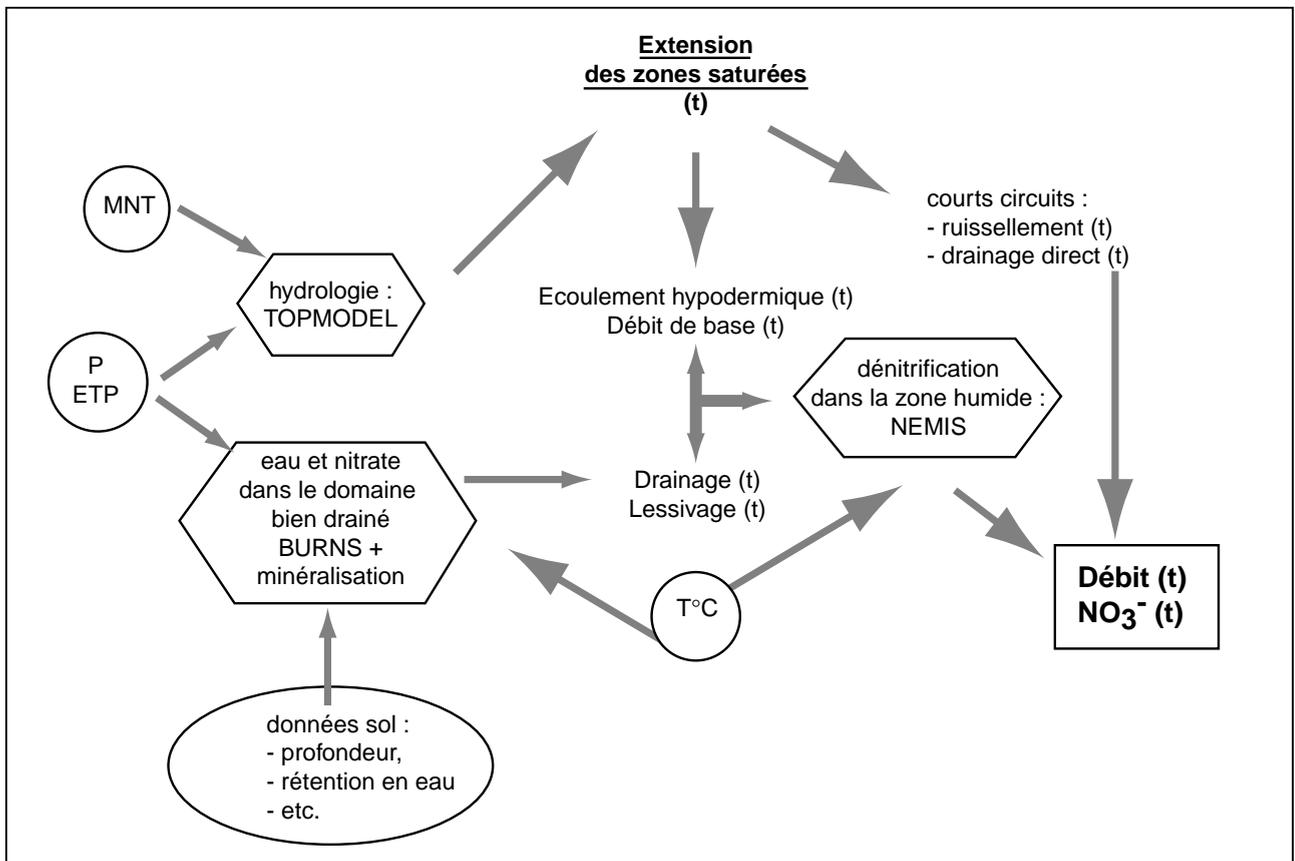


Figure 12 - Relation entre les concentrations moyennes annuelles en nitrate (●) et chlorures (△) à l'exutoire des sous-bassins versant et leurs surfaces relatives de sols hydromorphes.
 Figure 12 - Mean annual concentrations of nitrate (●) and chloride (△) at the outlet of the subcatchments vs. relative area of hydromorphic soils.

Figure 13 - Organigramme du modèle conceptuel de transfert de nitrate dans le bassin versant (entrées : ellipses et cercles ; sous-modèles : losanges ; sorties : rectangles).

Figure 13 - Conceptual model organigram of nitrate transfer in the catchment (input data : ellipse and circles ; sub-models : rhombs ; outputs : rectangles).



formaliser de façon exhaustive les mécanismes responsables de la dynamique de l'azote dans un bassin versant, mais simplement de tester si les processus majeurs mis en évidence dans cette étude permettent de rendre compte de cette dynamique, malgré une forte simplification, de la fourniture d'azote par l'agriculture.

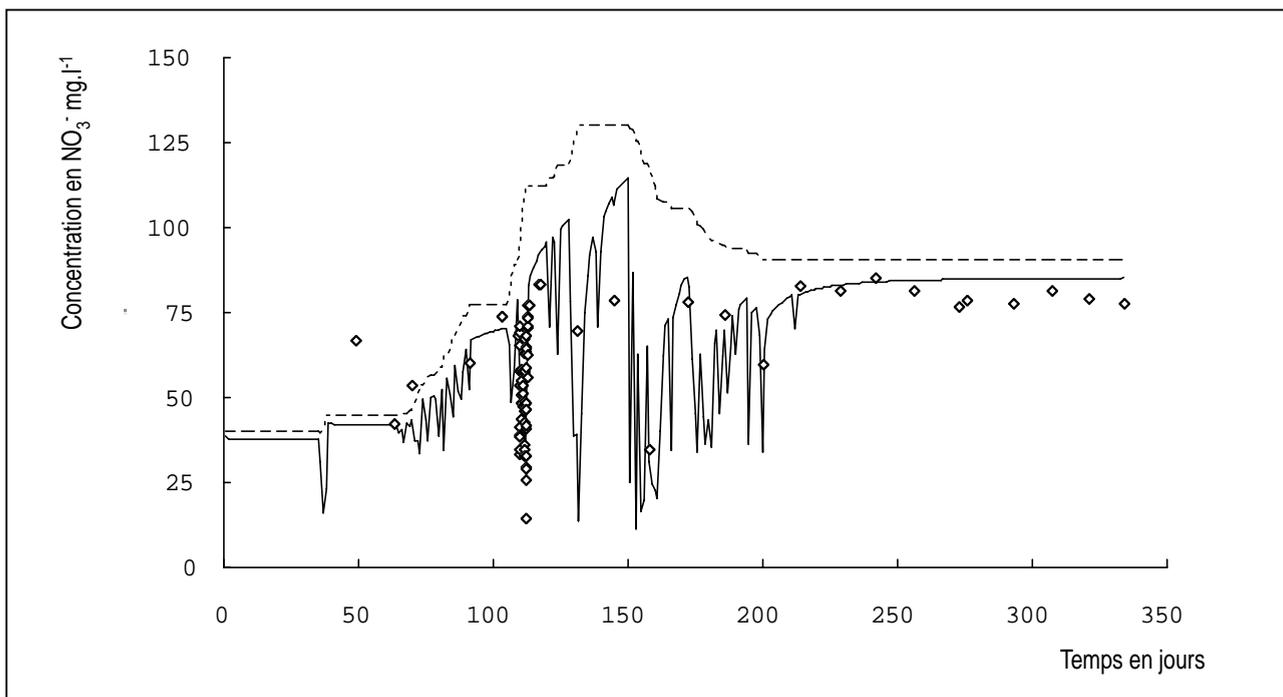
Sur le plan hydrologique, le modèle s'appuie sur TOPMODEL, dont l'aptitude à décrire le fonctionnement hydrologique et la distribution des sols a été testée ici. Ce modèle est couplé avec des modules de transfert et de biotransformation de l'azote prenant en compte l'essentiel des acquis de la présente étude : (i) un transfert vertical dans le domaine bien drainé ; (ii) une zone active dénitrifiante localisée dans la couche de surface des zones saturées ; (iii) un fonctionnement de cette zone active liée au cheminement de l'eau, qui peut être schématisé par trois écoulements latéraux superposés - le ruissellement de surface, l'écoulement de la nappe perchée dénitrifiante, l'écoulement de la nappe des horizons B et de l'altérite -. A ce dernier peuvent être rajoutés les courts-circuits latéraux consistant en une alimentation directe du ruisseau à la faveur des discontinuités de la zone saturée (drainage artificiel notamment). L'importance relative de ces écoulements va dépendre de l'extension des zones saturées : la participation du ruissellement de surface et de l'é-

coulement de la nappe perchée augmente avec l'extension des zones saturées tandis que celle du débit de base et de l'alimentation directe du ruisseau diminue. D'autre part, le modèle utilise les diverses données recueillies pour dimensionner les réservoirs et fixer les paramètres, ce qui réduit considérablement les paramètres à ajuster.

Le drainage et le lessivage de nitrate dans la zone non saturée est simulé par le modèle de Burns (1974), auquel a été rajouté une fonction de minéralisation dépendante de la température du sol. La distribution des profondeurs de sol sur l'ensemble du bassin versant est introduite pour obtenir la réponse de l'ensemble du bassin versant. Le tout se déverse dans un réservoir à vidange exponentielle analogue à la composante nappe de TOPMODEL. L'extension des zones saturées prédites par TOPMODEL permet de dimensionner le réservoir potentiellement dénitrifiant au cours du temps et de quantifier les courts-circuits : (i) le ruissellement sur zones saturées et (ii) l'alimentation directe du ruisseau par la nappe non dénitrifiée. La dénitrification est estimée par le modèle NEMIS (Hénault, 1993), prenant en compte le potentiel dénitrifiant mesuré, la température du sol et la concentration en nitrate. Par construction, on se place ici en conditions saturantes et on fait l'hypothèse que conditions saturantes

Figure 14 - Comparaison des concentrations en nitrate observées (♦) et simulées par le modèle (—) à l'exutoire du sous-bassin de Kervidy de septembre 1994 à juillet 1995, concentration simulée de la nappe (- - -).

Figure 14 - Comparison between observed (♦) and simulated (—) nitrate concentrations at the outlet of the Kervidy subcatchment from september 1994 to July 1995, groundwater simulated concentration (- - -).



équivalent à conditions anoxiques, ce qui n'est pas toujours vérifié (Jaffrezic, 1997).

Dans son état actuel, encore imparfait, ce modèle rend compte de la plupart des variations de concentrations en nitrate observées à l'exutoire de septembre à juin, moyennant l'initialisation du stock de nitrate disponible en début de cycle (figure 14). L'écart quadratique moyen entre les concentrations observées et mesurées est inférieur à 5 % de la concentration moyenne annuelle. Les écarts les plus importants peuvent être en partie attribués à la simplification des entrées d'azote, notamment la non prise en compte des apports de lisiers et des prélèvements par la végétation pendant la période de simulation, à la non prise en compte de courts-circuits géochimiques possibles et à l'hétérogénéité du fonctionnement hydrologique et biogéochimique à l'échelle locale.

CONCLUSIONS

L'identification du modèle d'organisation des sols du bassin versant et l'analyse de son fonctionnement hydrodynamique permettent : (i) d'établir un modèle de cheminement de l'eau dans le bassin versant, fonction de l'arrangement spatial des horizons pédologiques et (ii) d'extrapoler à d'autres bassins versants, présentant la même organisation, les résultats acquis sur le bassin versant expérimental.

L'hydrologie et la biogéochimie du bassin versant sont contrôlées par la topographie et la séparation du bassin versant en deux domaines : (i) les versants bien drainés, à transferts verticaux jusqu'à la nappe et (ii) les zones hydromorphes de bas-fonds, présentant une nappe perchée dénitrifiante et un ruissellement superficiel.

Cependant, ce schéma est sans doute trop simple pour représenter fidèlement la multiplicité des cheminements de l'eau. Deux exemples illustrent ce point de vue : l'importance des réseaux anthropiques (bocage, route...), sur lesquels des recherches sont en cours, vient perturber ce schéma ; l'écoulement dans le sol peut suivre des cheminements préférentiels liés aux macropores qu'il importe aussi de prendre en compte.

C'est au sein des sols hydromorphes que se jouent les processus majeurs de régulation de la teneur en nitrate, comme on a pu le montrer par la caractérisation de l'intensité de la dénitrification d'une part, et par une typologie de différents sous-bassins, établissant la relation inverse existant entre le pourcentage de sols hydromorphes et les flux spécifiques d'azote d'autre part. Cependant, l'analyse du cheminement de l'eau fait apparaître que le potentiel épurateur de ces zones n'est pas utilisé à plein en raison de l'existence de courts-circuits, du défaut de connexité de ces zones et d'une barrière géochimique potentielle.

En dépit des phénomènes d'épuration biologique naturels, la qualité des eaux à l'exutoire du bassin versant reste très

mauvaise. Il est donc nécessaire d'associer à des pratiques agricoles plus rationnelles une gestion et un aménagement très réfléchis de l'espace, afin d'optimiser les facultés épuratrices du milieu, et en particulier des zones humides. Les acquis de la présente étude permettent de préciser les bases de cette nouvelle gestion de l'espace : il s'agit de restaurer la continuité spatiale et temporelle d'une zone tampon épuratrice entre les parcelles cultivées et l'hydrosystème, en optimisant le rapport efficacité/capacité. Il s'agit aussi de mieux maîtriser les répercussions des aménagements hydrauliques sur l'émission de gaz à effet de serre vers l'atmosphère (N_2O , NO_x) et sur la mobilité du phosphore, des métaux et des pesticides.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tout particulièrement l'équipe technique de l'unité de Science du Sol de Rennes : Y. Benard, J. Berrier, L. Carreaux, G. Dutin, F. Garnier, A. Regeard, F. Rouault, pour sa contribution à l'acquisition des données sur le terrain par tous temps et aux nombreuses déterminations au laboratoire exigées par un tel programme ; Y. Couton et C. Devroe de l'unité de Microbiologie des sols de Dijon pour les mesures de dénitrification. Ils remercient aussi J.-M. Gréillon et A. Taha (Univ. Bordeaux 1) pour l'application du modèle multicouche à notre jeu de données.

BIBLIOGRAPHIE

- Antoni V., 1995 - Organisation spatiale des sols hydromorphes de fonds de vallée et modélisation prédictive de leur distribution. DEA Géosciences, filière Pédologie, Univ. Nancy I, 77 p.
- Aurousseau P., Curmi P., Bresson L.M., 1985 - Microscopy of the cambic horizon. In : Soil Micromorphology and Soil Classification (L.A. Douglas et M.L. Thompson, eds), SSSA Spec. Pub. n° 15, 49-61.
- Aurousseau P., Squidant H., 1996 - Rôle environnemental et identification cartographique des sols hydromorphes de bas fonds. Ingénieries EAT - 1995, 75-85.
- Baize D., Girard M.C., 1996 - Référentiel Pédologique 1995. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, France
- Benoit M., 1992 - Un indicateur des risques de pollution nommé bascule (Balance Azotée Spatialisée des systèmes de Culture de l'Exploitation). Courrier de la cellule de l'environnement de l'INRA, n° 18, 23-29.
- Beven J.K., Kirkby M.J., 1979 - A physically based, variable contributing area model of catchment hydrology. *Hydrol. Sci.*, 24, 43-69.
- Bijay-Singh, Ryden J.-C., Whitehead D.C., 1989 - Denitrification potential and actual ratio of denitrification in soils under long-term grassland and arable cropping. *Soil Biol. Biochem.*, 20, 897-901.
- Bouma J., 1989 - Using soil survey for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.*, 9, 177-213.
- Bouma J., Dekker L.W., 1981 - A method for measuring the vertical and horizontal Ksat of clay soils with macropores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45 : 662-663.

- Bourrié G., Maitre V., 1994 - Iron control in solutions from hydromorphic soils under temperate climate by equilibrium with a mixed Fe (II) - Fe (III) mineral, ferroso-ferric hydroxide. 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, Mexico, July 10-16, 1994, vol 3b, 143-144.
- Bourrié G., Maitre V., Curmi P., 1994 - Mise en évidence de deux dynamiques saisonnières du fer dans les sols hydromorphes en climat tempéré. C.R. Acad. Sci., Paris, 318-II, 87-92.
- Bruand A., 1990 - Improved prediction of water-retention properties of clayey soils by pedological stratification. J. of Soil Science, 41, 491-497.
- Bruneau P., Gascuel-Odoux C., Robin P., Mérot P., Beven K., 1995 - Sensitivity to space and time resolution of a hydrological model using digital elevation data. Hydrological Processes, Vol. 9, 69-81.
- Burns I.G., 1974 - A model for predicting the redistribution of salts applied to fallow soils after excess rainfall or evaporation. J. of Soil Science, 25 (2), 165-178.
- Burri P., 1994 - Rôle des facteurs du milieu sur la pollution des eaux en nitrate à l'échelle du bassin versant. Mémoire de fin d'étude, EPF Lausanne, 72 p.
- Cann C., 1990 - Transfer of nutrients in a region of intensive animal farming. In : Hydrological Research Basins and the Environment, Proceedings and Information/TNO committee on Hydrological Research n° 44, The Hague, NL, 311-318.
- Cheverry C., 1997 - Caractérisation et fonctionnement d'un bassin versant en climat tempéré océanique et en région d'élevage intensif. INRA (Ed.), Coll Science Update, 220 p.
- Cros-Cayot S., 1996 - Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armoricain. Thèse ENSAR « Sciences de l'environnement », 218 p. + annexes
- Crave A., Gascuel-Odoux C., 1997 - The influence of the topography on time and space distribution of soil surface water content. Hydrological processes vol. 11, 203-210.
- Curmi P., 1993 - Analyse structurale et dynamique actuelle des systèmes pédologiques. Mém. Habilitation à Diriger des Recherches, Univ. Rennes I, 83 p. + annexes.
- Curmi P., Widiatmaka, Pellerin J., Ruellan A., 1994 - Saprolite influence on formation of well-drained and hydromorphic horizons in an acid soil system as determined by structural analysis. In : Soil Micromorphology : Studies in Management and Genesis (A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys, eds), Developments in Soil Science 22, Elsevier, Amsterdam, 133-140.
- Curmi P., Durand P., Gascuel-Odoux C., Hallaire V., Mérot P., Robin P., Trolard F., Walter C., Bourrié G., 1995 - Le programme CORMORAN-INRA : de l'importance du milieu physique dans la régulation biogéochimique de la teneur en nitrate des eaux superficielles. Journal Européen d'Hydrologie, tome XXVI, fasc. 1, 37-56.
- Curmi P., Durand P., Gascuel-Odoux C., Mérot P., Walter C., Taha M., 1997 - Hydromorphic soils, hydrology and water quality : spatial distribution and functional modelling at different scales. Nutrient Cycling in Agroecosystems, (sous presse)
- Durand P., Juan Torres J.-L., 1996 - Solute transfer in agricultural catchments : the interest and limits of mixing models. J. Hydrol, 181, 1-22.
- Franks S., Gineste P., Beven K., Mérot P., 1997 - On constraining the predictions of distributed model : the incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process, Water Resources Research, accepted.
- Gascuel-Odoux C., Hubert-Moy L., Robin P., Walter C., 1994 - Quelle échelle est pertinente pour définir les paramètres de fonctionnement d'un modèle hydrologique en milieu agricole intensif ? Programme Environnement CNRS « Méthodes, Modèles et Théories ». « Les problèmes de multiplicité d'échelles d'espace et de temps dans les recherches sur l'environnement ». Rapport final de contrat, 47 p.
- Gascuel-Odoux C., Hallaire V., Mérot P., Robin P., 1996 - Structure des zones contributives de bas-fonds : modélisation et validation expérimentale. In : Etudes des Phénomènes Spatiaux en Agriculture (C. Christophe, S. Lardon et P. Monestiez éds), La Rochelle, 6-8 Déc. 1995, Paris, Inra, Les Colloques, n° 78, 201-213.
- Grimaldi M., Grimaldi C., 1996 - Fonctionnement hydrogéochimique et processus de transformation d'une couverture ferrallitique. In : Sols et transferts des polluants dans les paysages, (C. Walter et C. Cheverry eds), 5^{es} Journées Nationales de l'Etude des Sols, AFES, ENSA-INRA Rennes, 22-25 Avril 1996, 209-210.
- Hallaire V., Curmi P., 1994 - Image analysis of pore space morphology in soil sections, in relation to water movement. In : Soil Micromorphology : Studies in Management and Genesis (A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys, eds), Developments in Soil Science 22, Elsevier, Amsterdam, 559-567.
- Hallaire V., Curmi P., Widiatmaka, 1997 - Morphologie de la porosité et circulations préférentielles : cas des horizons d'un système pédologique armoricain. Etude et Gestion des Sols, volume 4, n°2.
- Hansen H.C.B., Koch C.B., Nancke-Krogh H., Borggaard O.K., Sorensen J., 1996 - Abiotic nitrate reduction to ammonium : key role of green rust. Env. Sci. et Technol., 30, 2053-2056.
- Hénault C. et Germon J.-C., 1995 - Quantification de la dénitrification et des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) par les sols. Agronomie, 15, 221-
- Hénault C., 1993 - Quantification de la dénitrification dans les sols à l'échelle de la parcelle cultivée à l'aide d'un modèle prévisionnel. Thèse de Doctorat, ENSA Montpellier, 132p.
- Jaffrezic A., 1997 - Géochimie des éléments métalliques, des nitrates et du carbone dissous dans les eaux et les sols hydromorphes. Agriculture intensive et qualité des eaux dans les zones humides en Bretagne. Thèse de Doctorat, ENSA de Rennes, 190 p.
- Maitre V., 1991 - Géochimie des eaux libres extraites de sols hydromorphes sur granite dans le Massif Armoricain. Mobilité du fer et dynamique saisonnière. Thèse Univ. Paris 6, INRA Rennes, 183 p.
- Mérot P., 1988 - Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation. Hydrol. continent., 3, 105-115.
- Mérot P., Durand P., 1995 - Assessing the representativity of catchments according to their size from hydrochemical observations. IAHS Publication, 226, 105-112.
- Mérot P., Durand P., Morisson C., 1995a - Four-component hydrograph separation using isotopic and chemical determinations in an agricultural catchment in Western France. Phys. Chem. Earth, 20, 3-4, 415-425.
- Mérot P., Ezzahar B., Walter C., Arousseau P., 1995b - Mapping waterlogging of soils using digital terrain models. Hydrological Processes, 9, 27-34.
- Mimault S., 1993 - Les pratiques agricoles susceptibles d'engendrer une pollution nitrique sur le bassin de Naizin (56) : diagnostic et propositions. Mémoire de DAA Sciences et Techniques des Productions Végétales, I.N.R.A. Rennes, I.N.A. Paris-Grignon, 93 p + annexes
- Pauwels H., 1996 - Preliminary results on chemical variations in a schist aquifer : implication for nitrate transport and denitrification. In : Hydrologie dans les pays celtiques (P. Mérot et A. Jigorel eds) Rennes, 8-11 juillet 1996, INRA, Les colloques, 79, 111-117.
- Parkin T.B., Kaspar H.F., Sexstone A. J., Tiedje J. M., 1984 - A gas flow soil core method to measure field denitrification rates. Soil Biol. Biochem., 16, 4, 323-330.
- Ponnamperuma F.N., 1972 - The chemistry of submerged soils. Advances in Agronomy, 24, 173-189.
- Rismondo L., 1993 - Activité dénitrifiante des sols en fonction de leur position topographique dans un bassin versant. Mesure de l'activité dénitrifiante réelle et potentielle sur des sols du bassin versant de Naizin. Mémoire

- ENSAR, 79 p. + annexes
- Roussel F., 1982 - Horizons and microscopic organizations characteristic of degraded soils on cambrian schists in central Brittany. In : Soil micro-morphology, Volume II : Soil Genesis (P. Bullock et C.P. Murphy, eds), AB Academic Publishers, 559-565.
- Stackman W.P., Valk G.A., Van Der Harst G.G., 1969 - Determination of soil moisture retention curves, vol 1, Sand box apparatus (range 0 to 2.7). Institute for land and water management research, Wageningen, The Netherlands. 19 p.
- Taha A., Grésillon J.-M., 1994 - Modelling the link between hillslope water movement and river flow : application to a small Mediterranean catchment. In : Oceans, Atmosphere, Hydrosphere et Non-Linear Geophysics (Proc. XIX EGS General Assembly, Annales Geophysicae, Grenoble), part II, suppl. II to vol. 12.
- Thiersault N., Rodriguez Lado L., 1994 - Un modèle de prédiction de la distribution spatiale des sols hydromorphes à partir des critères topographiques. Mémoire DAA « Génie de l'Environnement, Option Sol et Aménagement ». ENSA-INRA Rennes, Faculté de Biologie, Univ. Santiago de Compostela, 64 p.
- Trolard F., Bidois J., Bourrié G., Curmi P., Durand P., Germon J.-C., Hénault C., Risondo L., Soulier A., 1995 - Mise au point d'une typologie des milieux réducteurs naturels en relation avec le potentiel dénitrifiant des sols. Rapport final. Convention 303/93 Ministère de l'Environnement (SRETIE) - INRA, 80 p.
- Trolard F., Abdelmoula M., Bourrié G., Humbert B., Génin J.M.R., 1996 - Mise en évidence d'un constituant de type « rouilles vertes » dans les sols hydromorphes. Proposition de l'existence d'un nouveau minéral : la « fougérite ». C.R.A.S., Paris, 323-IIa, 1015-1022.
- Trolard F., Génin J.M.R., Abdelmoula M., Bourrié G., Humbert B., Herbillon H., 1997 - Identification of a green rust mineral in a reductomorphic soil by Mössbauer and Raman spectroscopies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 5, 1107-1111.
- Van Vliet-Lanoë B., Pellerin J., Chauvel J.-J., 1997 - Le cadre géologique et géomorphologique. In : Caractérisation et fonctionnement d'un bassin versant en climat tempéré océanique et en région d'élevage intensif. (C. Cheverry, éd.) INRA, Coll Science Update, (soumis)
- Walter C., 1990 - Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle : cartographie pédologique et géostatistique sur un secteur du sud de l'Ille-et-Vilaine (France). Thèse de doctorat de l'Université Paris 6. ENSA-INRA Rennes, SDS 437, 175 p.
- Walter C., Gourru M., Nicolas J.-M., 1993 - Carte pédologique de la partie amont du bassin versant de Naizin à l'échelle du 1/10.000.
- Walter C., Curmi P., Gascuel-Oudou C., 1996 - Pertinence du découpage pédologique pour l'estimation spatiale des propriétés physiques du sol. Validation à l'échelle d'un bassin versant. In : Etudes des Phénomènes Spatiaux en Agriculture (C. Christophe, S. Lardon et P. Monestiez eds) La Rochelle, 6-8 Déc. 1995, Paris, Inra, Les Colloques, 78, 97-110.
- Walter C., Curmi P., 1997 - Les sols du bassin versant du Coët Dan : organisation, variabilité spatiale et cartographie. In : Caractérisation et fonctionnement d'un bassin versant en climat tempéré océanique et en région d'élevage intensif. (C. Cheverry, éd.) INRA, Coll Science Update, (soumis)
- Widiatmaka 1994 - Analyse structurale et fonctionnement hydrique d'un système pédologique limoneux acide sur granite et sur schiste de Massif armoricain, France. Thèse, ENSA Rennes, 260 p.
- Widiatmaka, Curmi P., 1994 - Soil horizons hydrodynamic characteristics of an acid soil system. Interest of their grouping according to functional properties for spatial transposition. 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, Mexico, July 10-16, 1994, vol 2b, 151-152.
- Zida M., Curmi P., Hallaire V., Grimaldi M., 1996 - Fonctionnement d'un système pédologique armoricain (bassin versant du Coët Dan) : II Variations saisonnières et au cours des averses de l'état hydrique du sol. In : Sols

et transferts des polluants dans les paysages (C. Walter et

C. Cheverry, Eds), 5^{es} Journées Nationales de l'Etude des Sols, AFES,

ENSA-INRA Rennes, 22-25 Avril 1996, 263-264.