

## Les voies de transfert : Circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

J. Molénat, J.M. Dorioz, C. Gascuel et G. Gruau

### I - Généralités

Les bassins versants bretons sont majoritairement des bassins sur socle ancien granitique ou schisteux. Ils reposent sur un substrat peu profond et peu perméable qui permet l'accumulation de l'eau tombée sur le versant et la constitution d'une nappe présente en continu sur l'ensemble du bassin versant (Figure 1).

On peut grossièrement schématiser les versants par une succession de couches de la surface vers la profondeur :

- le sol (0 à 1 m), couche de faible épaisseur à forte perméabilité où se produisent la majorité des transformations biogéochimiques du fait de la présence de matière organique et d'une activité biologique intense,
- les couches altérées du socle ou *altérite* (1-30 m), globalement plus épaisses en haut qu'en bas de versant mais très variables spatialement. Sa perméabilité dépend de leur épaisseur mais aussi de leur degré d'altération qui influe sur la porosité,
- le substrat ou *roche mère* ou *socle*. Il est considéré comme peu perméable et très hétérogène du fait de la présence irrégulière de fissures de taille très variable.

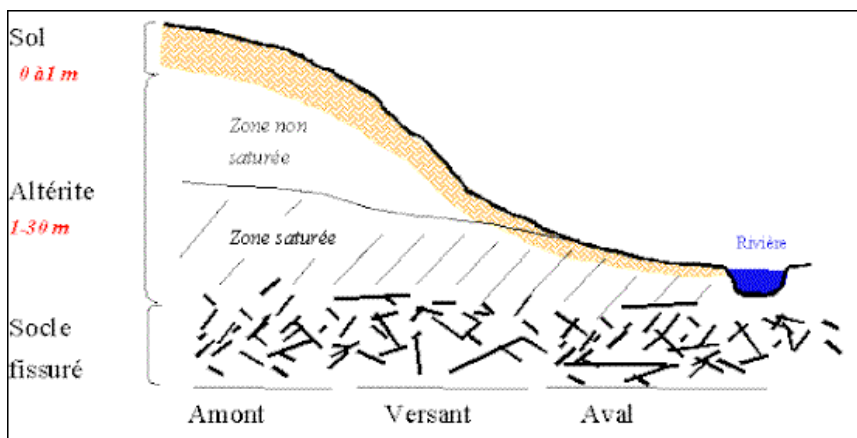


Figure 1 : schéma de la répartition des différentes couches constituant le contexte hydrologique d'un bassin versant sur socle en Bretagne.

La pluie se répartit donc en deux composantes :

- une partie qui est restituée sous forme gazeuse à l'atmosphère par évapotranspiration. Cette partie est relativement constante sur la Bretagne (de l'ordre de 300-400 mm).
- une partie qui ruisselle ou s'infiltre, c'est la pluie efficace en hydrologie car elle contribue à l'écoulement. Elle représente de un tiers à la moitié des pluies annuelles. Elle augmente d'est en ouest avec les précipitations.

L'écoulement annuel de la rivière est la dernière étape des déplacements de l'eau de pluie dans le bassin versant.

Les déplacements de l'eau se réalisent pendant les pluies mais aussi en dehors des pluies, soit à la surface du sol, soit dans le sol et le sous-sol (altérite, socle). Ces déplacements d'eau sont localisés :

- dans la zone non saturée qui correspond à la couche du sol et de sous-sol dont les vides sont remplis en partie d'air et en partie d'eau,
- dans la zone saturée : toute la porosité est remplie d'eau, le milieu est saturé et constitue ce qu'on appelle la **nappe**.

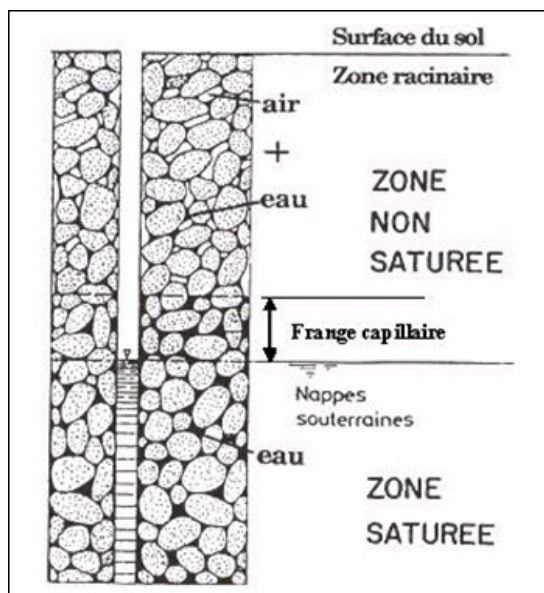
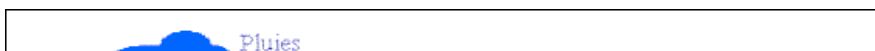


Figure 2: Distinction entre la zone non saturée et la zone saturée

La figure 3 illustre les différents mécanismes en jeu dans un versant pendant une pluie. Ils sont ensuite détaillés dans le texte.



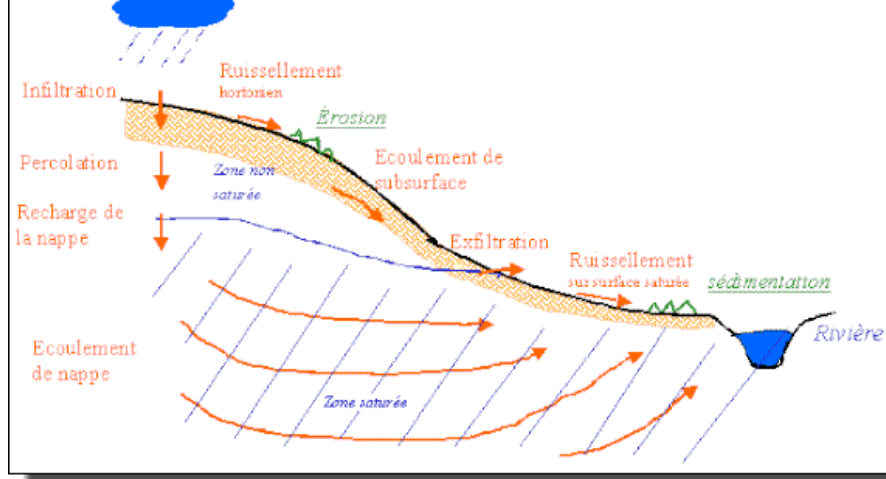


Figure 3 : Les circulations de l'eau et des particules lors d'un épisode pluvieux le long d'un versant. L'évapotranspiration n'est pas représentée.

Le rôle de la nappe est prépondérant sur les écoulements de la rivière. La nappe fournit 90-95 % de l'eau qui arrive aux rivières. Ceci signifie qu'à l'échelle de l'année, la quasi-totalité de l'eau transite par la nappe.

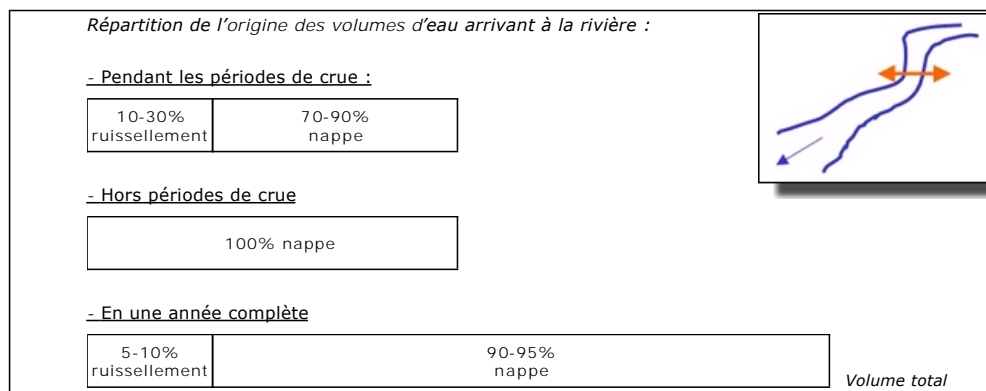


Figure 4: Répartition des volumes transitant sur une section de rivière selon les événements hydrologiques.

Le ruissellement, processus évoqué pour certaines formes de pollution de l'eau, et bien identifié par les agriculteurs, ne joue qu'en périodes de crue (il peut alors ponctuellement représenter 20 à 30 % du débit) et beaucoup plus sur certains types de surface (surfaces des zones urbaines), mais ce n'est pas la source d'eau majeure d'alimentation pour la rivière (figure 4).

<sup>1</sup> Activités microbiennes, absorption et restitution par les végétaux ...

## Les voies de transfert : Circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

J. Molénat, J.M. Dorioz, C. Gascuel et G. Gruau

### 11- Infiltration et percolation de l'eau

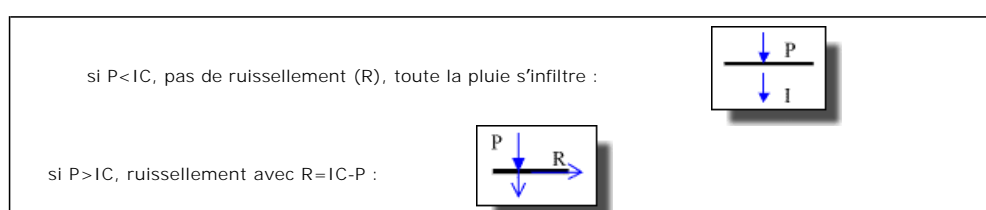
L'infiltration est le passage de l'eau de la surface du sol à l'intérieur de celui-ci. Lorsque le sol est suffisamment humide, mais pas encore saturé, une fraction de l'eau percole et descend verticalement vers la nappe. La percolation dépend donc du volume d'eau précipité et de l'humidité du sol. Elle se distingue de l'infiltration car elle désigne l'écoulement de l'eau à l'intérieur du sol.

L'eau dans le sol peut suivre deux chemins : passer par la porosité fine du sol (voie majoritaire) ou être guidée par les macropores (quelques % du flux). C'est la combinaison de ces déplacements qui est en général mesurée.

L'infiltration (I en mm) de la pluie (P en mm/h) dans le sol est contrôlée par sa capacité d'infiltration (IC en mm/h). La capacité d'infiltration d'un sol est définie comme le flux maximum que le sol est en mesure d'absorber à travers sa surface.

Elle dépend :

- du type de sol (sable>limon>argileux),
- de son état structural (présence de mottes, croûtes)
- de son humidité initiale au moment d'une pluie.



Sa valeur est très variable dans le temps puisque l'état structural de surface évolue sous l'effet de la pluie, de l'activité biologique (présence de macropores) et de facteurs anthropiques (système de culture, itinéraires techniques). Elle est variable au cours même d'une pluie en fonction de l'évolution de l'humidité du sol et peut notamment décroître de manière significative au cours d'une pluie intense.

Sa valeur est enfin très variable dans l'espace selon les caractéristiques des sols, notamment en fonction de leur stabilité structurale.

La partie qui ne s'infiltre pas est appelée ruissellement.

## Les voies de transfert : Circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

*J. Molénat, J.M. Dorioz, C. Gascuel et G. Gruau*

### 111- Ruissellement et érosions

Le ruissellement est l'écoulement de l'eau à la surface du sol. Il s'accompagne de transport de matières à l'état dissous ou particulaire (érosion). Parce que les effets du ruissellement sont souvent visibles (formation de rigoles, de ravines, déplacements de terre), c'est un processus que s'approprient facilement les agriculteurs. Pourtant, il ne participe qu'à quelques pour cent du bilan annuel des écoulements car il n'intervient qu'au cours de quelques averses par an ou sur certaines parties du bassin versant où la nappe affleure.

Il existe deux types de ruissellement :

- par dépassement de la capacité d'infiltration du sol
- sur surface saturée.

#### 1- Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration

Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration ou hortonien survient lorsque l'intensité de pluie (P en mm/h) est supérieure à la capacité d'infiltration instantanée du sol (IC en mm/h) en surface. L'infiltration de la pluie devient alors très faible.

Ce ruissellement est à la fois fonction de la pluie, de l'état structural du sol et de son humidité. Il est variable dans le temps et l'espace. Compte tenu des propriétés hydrodynamiques des sols et des intensités de pluie rencontrées en Bretagne, le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration se produit seulement pour quelques averses par an (environ une à deux par mois pour la région de Rennes dont les sols sont à faible stabilité structurale). Il est notamment favorisé sur les sols nus où la formation d'une croûte de battance apparaît plus facilement (figure 6). Il peut également apparaître très localement dans les traces laissées par les engins agricoles qui compactent le sol.

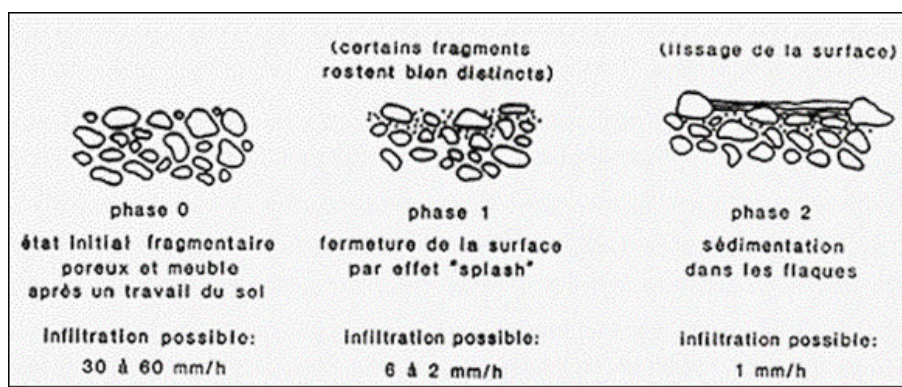


Figure 6 : Développement d'une croûte de battance à la surface du sol sous l'effet de la pluie. Extrait de Cosandey, 1990, d'après les travaux de J. Boiffin.

Les cumuls horaires des pluies ne permettent pas d'appréhender les phénomènes de ruissellement car l'intensité des averses varie sur un pas de temps plus court : le ruissellement est souvent déclenché sur quelques minutes voir quelques dizaines de minutes.

<b>Quelques chiffres en Bretagne</b>			
capacité d'infiltration après travail du sol : 30 à 60 mm/h			
capacité d'infiltration d'un sol battant ou encroûté : 1 mm/h			
Enregistrements entre 2000 et 2002	Rennes (35)	Naizin (56)	Plomelin (29)
maximum de pluies en cumul horaire	28.0 mm/h	12.5 mm/h	31.0 mm/h
Nombre d'averses > 10 mm/h dans l'année	2 fois	1 fois	3 fois

#### 2- Le ruissellement sur sols saturés

Il est aussi appelé *ruissellement de zone contributive* ou *ruissellement de source à surface variable*.

Il se produit lorsque le sol est gorgé d'eau (porosité remplie d'eau). La capacité du sol à stocker une quantité plus importante d'eau est dépassée: le sol "déborde". C'est le cas à la suite d'une remontée ou émergence de

nappe. Contrairement au ruissellement Hortonien, la genèse de ce ruissellement est indépendante de l'intensité des pluies : elle dépend du cumul de pluie et des conditions du milieu.

Ce processus se produit dans les zones à nappes superficielles comme les massifs anciens (Massif Armoricain, Massif Central). Les surfaces saturées se développent notamment dans les zones de bas fond et concernent plus rarement les zones de plateaux où les sols sont généralement bien drainés. Les surfaces saturées se forment en hiver, lors de la remontée de nappe, au cours des averses et se contractent ensuite. Les sols présentant à un niveau ou à un autre un horizon imperméable (semelle de labour) génèrent aussi ce type de ruissellement puisqu'ils sont plus rapidement saturés en eau.

### 3- Ruissellement, érosion hydrique et sédimentation

L'érosion hydrique est un phénomène résultant de plusieurs processus qui se distinguent notamment par le caractère diffus ou concentré des dépôts de terre.

L'érosion est diffuse lorsqu'elle s'opère sur l'ensemble de la surface, que la pente est faible (< 3 %) et que la force du ruissellement n'est pas suffisante pour arracher des particules de terre au sol de manière importante. Elle devient concentrée lorsque le ruissellement est lui-même concentré provoquant la formation de rigoles et de ravinement, notamment lors de pluies orageuses et dans les zones de collecte des eaux (talweg dans une grande parcelle de sol nu).

L'érosion des terres en Bretagne existe bien qu'elle soit en général diffuse et peu perceptible. Les pertes en terres cumulées peuvent être évaluées à 300 kg/ha/an pour une culture de maïs (Cros Cayot, 1996), quelques kg à quelques centaines de kg sur des petits bassins versants (Lefrançois, 2007). À l'échelle locale, l'érosion des berges, la connectivité des parcelles par les chemins, importante dans les secteurs d'élevage, peut jouer un rôle déterminant sur ce bilan. À l'échelle régionale, la faible teneur en matière organique du sol, donc sa faible stabilité structurale des sols est un facteur important. Cette érosion est très variable d'une année à l'autre, liée à la saisonnalité (érosion hivernale sur sol saturés) et à la présence d'événements majeurs (érosion de printemps liée à des cultures recouvrant très peu le sol).

La sédimentation des particules se produit au contraire lorsque la vitesse du ruissellement n'est plus suffisante pour maintenir les particules en mouvement. À une même vitesse d'écoulement, les limons se déposent en premier alors que la sédimentation sera plus longue pour les argiles. Cette sédimentation agit à toutes les échelles, depuis le versant, jusqu'à la sédimentation à l'intérieur même du cours d'eau.

### 4- L'exfiltration

Il y a exfiltration quand le sol n'a plus la capacité de transmettre tout le flux de nappe. Une partie de la nappe s'écoule alors à la surface. Elle survient notamment dans les talwegs concaves. Pendant les périodes humides, du fait de la remontée de la nappe, on observe une extension progressive de cette zone d'émergence.

Exfiltration et ruissellement sur zone saturée sont réunis sous le nom d'écoulement de zone contributive.

### Conclusion

Ces mécanismes font que la relation entre la pluie et le débit est :

- non proportionnelle (stockage possible d'eau lié à des circulations souterraines, restitution par évapotranspiration),
- variable d'une crue à l'autre, d'une saison à l'autre, d'une année à l'autre, pour un même bassin versant,
- variable d'un bassin versant à un autre selon les conditions géologiques, pédologiques, climatiques et selon l'occupation du sol.

## Les voies de transfert : Circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

*J. Molénat, J.M. Dorioz, C. Gascuel et G. Gruau*

### IV- Les écoulements de nappe

Les écoulements dans la nappe sont alimentés par les eaux de percolation (figure 3). Ils sont aussi nommés écoulements souterrains ou écoulements de base (sous entendu hors crue). L'écoulement de base n'intervient en effet que pour une faible part dans l'écoulement de crue à cause des faibles vitesses de l'eau dans le sous-sol.

De plus, ils ne sont pas toujours reliés au même événement pluvieux que l'écoulement de surface : ils proviennent généralement des pluies antérieures. Les écoulements de nappe assurent en général le débit des rivières en l'absence de précipitations et soutiennent les débits d'étiage (l'écoulement souterrain des régions karstiques fait exception à cette règle).

En Bretagne, la nappe est relativement **superficielle** par rapport à d'autres régions françaises puisque son toit est au maximum distant de la surface d'une trentaine de mètres et plus souvent situé à quelques mètres, voire atteint la surface du sol en fond de vallée. Cela est lié à la structure et à la géologie du sous-sol breton, considéré comme peu perméable.

### 1- Toit de la nappe et position topographique dans le bassin versant, écoulement de subsurface

Dans certaines parties du bassin versant, la nappe est proche de la surface.

Ce sont :

- les zones de bas de versant, à proximité des cours d'eau, où la nappe, suite aux précipitations d'automne sur l'ensemble du bassin versant, affleure en hiver. Tout le profil de sol est alors saturé " par le dessous ", c'est-à-dire par une remontée de nappe
  - les zones de résurgence situées dans le versant (" mouillères ") où la présence en surface de la nappe est due à la proximité de la roche mère ou à la présence d'horizons imperméables peu profonds
- Ceci se traduit par la présence dans le paysage de zones engorgées en eau, avec la présence possible de flaques. Ces zones sont à distinguer de la présence d'eau due à une semelle de labour.

Dans les autres parties du versant, la nappe est généralement située à plusieurs mètres de profondeur.

Enfin, au cours d'une averse, lorsque le sol est déjà saturé en eau, une partie des précipitations infiltrées chemine quasi horizontalement dans les couches supérieures du sol pour réapparaître à l'air libre, à la rencontre d'un chenal d'écoulement (par exemple, un fossé, un drain). Cette eau qui peut contribuer rapidement au gonflement de la crue est désignée sous le terme d'écoulement de subsurface (aussi appelé, dans le passé, écoulement hypodermique ou retardé). L'importance de cette partie des précipitations infiltrées et transférées horizontalement dépend essentiellement de la structure du sol. Elle est favorisée par la présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur. Cet écoulement qui peut être important tend à ralentir le cheminement de l'eau et allonge la durée de la crue.

### 2- Réactivité de la nappe aux pluies : l'influence de la porosité du milieu

La nappe est très réactive aux pluies : elle peut monter de plusieurs centimètres en quelques heures en hiver lorsque le cumul des pluies est important. A l'échelle de l'année, la profondeur de la nappe peut varier de plusieurs mètres entre le mois de janvier et l'été.

Cette réactivité à la pluie dépend de la porosité de drainage du sol et de l'altérité (c'est à dire le nombre et la taille des espaces par laquelle elle peut circuler). Elle dépend de la nature de la roche mère mais aussi du degré d'altération de la roche. Elle peut donc varier selon le bassin versant considéré et sur un même bassin entre l'aval et l'amont, comme cela a été estimé sur deux petits bassins versants sur granite (figure 7).

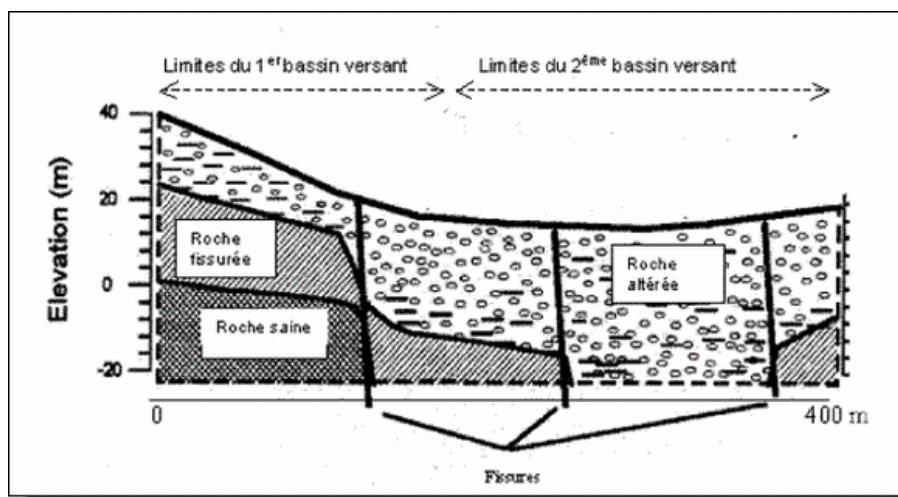


Figure 7 : Interprétation de l'épaisseur de l'altérité sur deux petits bassins versants granitiques finistériens (D'après Legchenko et al., 2003, extrait de Martin, 2003, interprétation par Résonance Magnétique Protonique et résistivité électrique).

### 3- Estimer la vitesse des écoulements dans la nappe

Les écoulements dans la nappe sont déterminés par la différence de charge entre deux points. Ainsi la mise en charge de la nappe en hiver par les pluies entraîne la formation d'un gradient hydraulique entre l'amont et l'aval (figure 10). Le gradient hydraulique correspond à la pente de la surface de la nappe. Plus ce gradient hydraulique est fort, plus la dynamique d'écoulement des eaux sera rapide.

La vitesse de circulation de l'eau dans la nappe dépend donc :

- de la porosité de drainage. Ce paramètre n'évolue pas au cours du temps, il dépend de la roche mère et de son degré d'altération.
- de l'intensité du gradient hydraulique. Comme la surface de la nappe est *grosso modo* parallèle à la surface du sol, le gradient est souvent assimilé à la pente topographique en première approximation. Les zones de pente élevée ont donc des gradients hydrauliques forts comparés aux zones de plateaux : l'eau y circule donc plus rapidement.
- du cumul de pluies qui augmente le gradient hydraulique.

Au sein d'un même bassin, les écoulements dans la nappe seront donc plus ou moins rapides selon la partie de la nappe considérée et les saisons.

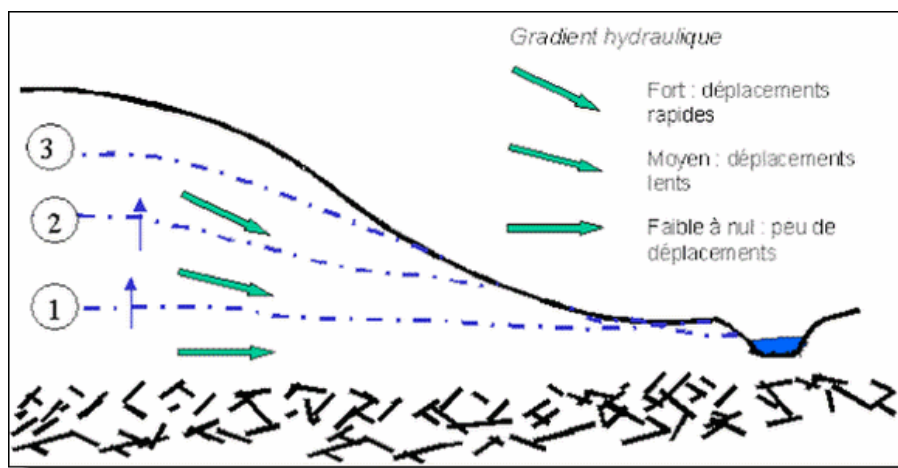


Figure 8 : Variations des hauteurs de la nappe au cours de l'année du fait de sa forte réactivité aux pluies et, en conséquence, des gradients hydrauliques à mi versant (flèches pleines vertes).  
1 - Niveau minimum d'été, gradient faible 2- Niveau intermédiaire plus ou moins haut selon le cumul des pluies (automne-hiver), gradient en augmentation 3- Niveau de fin d'hiver (maximum), gradient fort.

### 4- Stratification chimique de la nappe

Du fait des caractéristiques différentes des écoulements au sein de la nappe (affleurement ou non dans les horizons supérieurs du sol, vitesse plus ou moins rapides des écoulements ...), la nappe présente souvent une composition chimique différente en surface et en profondeur : elle est stratifiée. On distingue en général 2 zones :

- La nappe en surface (jusqu'à 10-15 mètres de profondeur), appelée aussi nappe d'altérité. Lorsque ce réservoir est en forte charge hydraulique (hiver), il contribue fortement au débit de la rivière. Sur le bassin versant de Naizin (56), les concentrations en nitrates y sont stables et fortes de l'ordre de 80 mg/l (soit environ 2 fois la concentration mesurée dans la rivière) avec des pointes à 200 mg/l.
- La nappe en profondeur, située à plusieurs dizaines de mètres. Elle est plus ou moins chargée en nitrates selon l'histoire agricole du bassin versant mais aussi des possibilités d'épuration qui peuvent s'y produire (dénitrification autotrophe par la pyrite (voir le chapitre [Evaluation scientifique des fonctions assurant la protection de la ressource en eau](#))).



## Les voies de transfert : Circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

J. Molénat, J.M. Dorioz, C. Gascuel et G. Gruau

### V- Vitesse de transfert

La zone non saturée, le ruissellement et l'écoulement dans la nappe ne sont pas soumises aux mêmes mécanismes de transfert : les vitesses des écoulements de l'eau y sont très différentes.

#### 1- Ecoulement par ruissellement

La vitesse du ruissellement de surface est la plus rapide, de l'ordre du 1 m/s ou 1 m/mn selon la rugosité du sol et la pente rencontrées.

#### 2- Ecoulement dans la zone non saturée

Les mécanismes de transfert de l'eau dans la zone non saturée dépendent du type de sol, des conditions hydriques initiales, de l'intensité de la pluie et des pratiques culturales. Les vitesses sont de deux ordres de grandeur :

- la vitesse de déplacement vertical de l'eau à travers la porosité fine du sol (écoulement matriciel) est lente, de l'ordre de 1 m/an,
- l'écoulement via les macropores est une voie rapide (1 m/ h) mais ne représente que quelques % de l'eau qui transite dans le sol. Elle peut être déterminante pour des polluants dont le problème n'est pas tant la quantité percolée (nitrate) que le risque de percolation (pesticide) vers la nappe.

#### 3- Ecoulement dans la zone saturée (nappe)

Les mesures directes dans la nappe en haut du versant ne sont pas possibles car le toit de la nappe y est situé à plusieurs mètres de profondeur. Les estimations de la vitesse des écoulements ne sont donc réalisées que par modélisation. Les résultats sont aujourd'hui entachés d'une très grande incertitude mais montrent cependant clairement que :

- la distance relative à la rivière (qui est fonction de la longueur du versant) influe de manière importante sur les temps de transfert,
- seules les zones à proximité du cours d'eau peuvent transférer l'eau qu'elles reçoivent dans l'année.

Du fait de la variabilité d'un bassin versant à un autre, l'exemple du bassin versant de Kervidy-Naizin ci-dessous (figure 9) donne des ordres de grandeur mais n'est donc pas transposable directement à d'autres bassins versants.

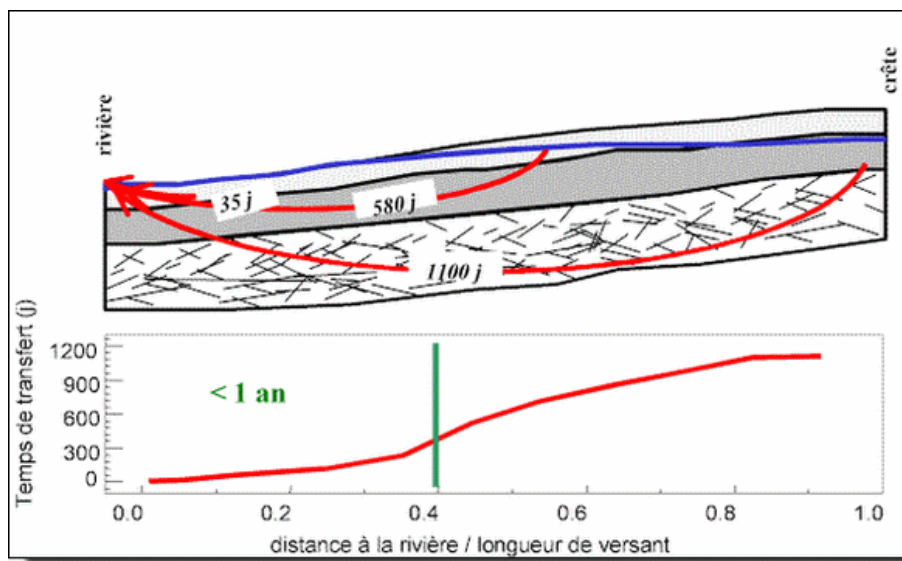


Figure 9 : Temps de transfert de l'eau estimés par modélisation sur un versant du bassin versant de Kervidy-Naizin (56), (Molénat et Gascuel-Odoux, 2002) : sur les 40% de la longueur du versant, l'eau arrive à la rivière dans l'année, sur le reste, elle va mettre plus d'un an, ceci en ne considérant que le transfert dans la nappe.

## Les voies de transfert : Circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

J. Molénat, J.M. Dorioz, C. Gascuel et G. Gruau

### E- Le chemin de l'eau du sol à la nappe, puis à la rivière : longueur, obstacles et temps de transfert

Le chemin de l'eau de pluie lorsqu'elle atteint le sol et avant d'alimenter la nappe mérite beaucoup d'attention car suivant la longueur et les obstacles rencontrés sur son parcours, l'eau va atteindre la rivière plus ou moins rapidement et plus ou moins chargée en éléments polluants.

Dans un versant, on distingue le plus souvent, trois zones selon les écoulements qui s'y produisent :

- le haut de versant ou les zones de plateau
- la partie en pente du versant
- la zone de fond de vallée

#### 1- Le haut de versant ou les zones de plateau

Dans cette zone, les sols sont généralement bien drainés et l'écoulement est vertical. Les transferts sont alors

assez indépendants d'une parcelle à l'autre. La nappe est assez éloignée de la surface (plusieurs mètres). La distance entre la surface du sol et la nappe est longue, le temps de transfert entre ces deux compartiments aussi. La vitesse de l'eau dans la nappe est faible du fait d'un faible gradient hydraulique et l'eau va aller, au sein de la nappe, très lentement vers la rivière. Les biotransformations, concernant notamment les éléments adsorbés sur le sol, ont lieu dans les premiers décimètres de sol (couche riche en matière organique).

## 2- La partie en pente du versant

Cette partie du versant est le lieu de transferts latéraux relativement rapides. Les transferts ne sont plus indépendants d'une parcelle à l'autre puisqu'il existe des déplacements latéraux entre parcelles voisines. Les transferts latéraux sont plus ou moins longs et ont pour caractéristique de se dérouler dans un milieu moins profond et donc potentiellement plus propice aux biotransformations. La charge hydraulique est plus importante notamment en hiver ce qui augmente les vitesses de circulation de l'eau de nappe. Enfin, la présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur favorise ce type d'écoulement.

## 3- Le fond de vallée

C'est la partie la plus basse topographiquement où la nappe est proche de la surface toute l'année (0-2 m). C'est la forme du fond de vallée, plus ou moins encaissée, qui favorise ou non l'extension de la zone saturée en surface. Dans ce cas, les déplacements latéraux sont très importants et les temps de transferts sont courts. De plus, il se produit des déplacements de la profondeur vers la surface : la nappe, interceptant la surface du sol est le lieu d'exfiltration d'une eau plus profonde qui peut alimenter directement le cours d'eau, en passant par un horizon riche en matière organique et où ont lieu des biotransformations.

Dans la pratique, l'importance de ces 3 zones est différente selon les bassins versants. La figure 10 montre 4 contextes observés sur le bassin versant de Saint Léger où ces 3 zones d'écoulement sont différemment représentées.

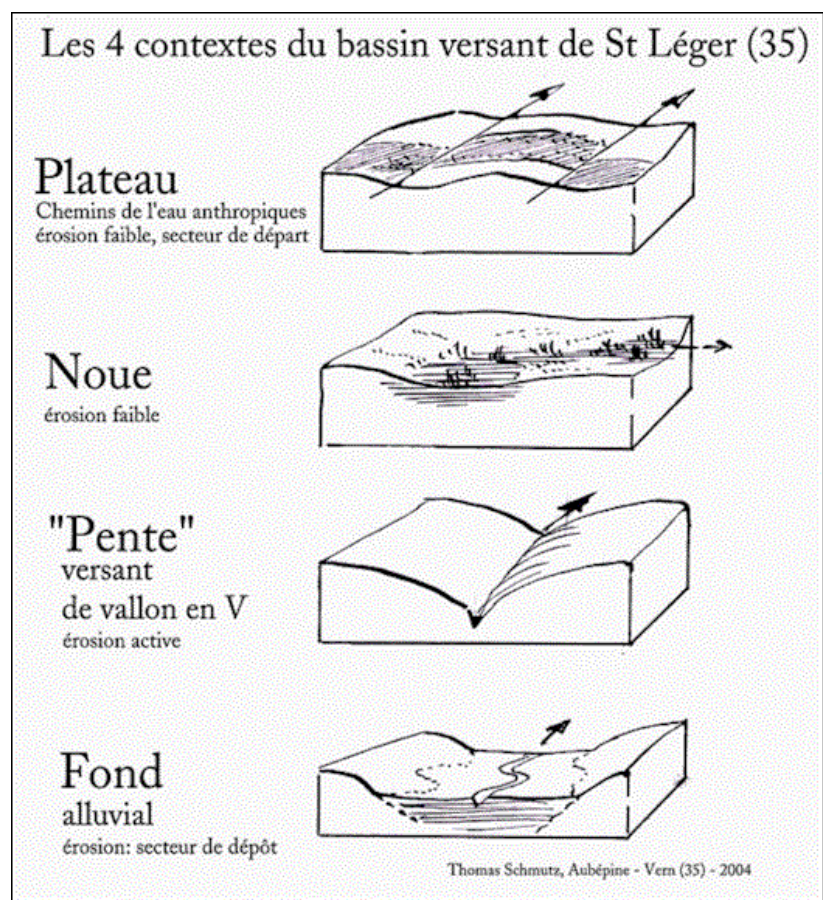


Figure 10 : Illustration de différentes morphologies de bassin versant. Le cas de St Léger. (T. Schmutz, Aubépine, 2004).

## Les voies de transfert : Circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

J. Molénat, J.M. Dorioz, C. Gascuel et G. Gruau

### VII- Conclusion : Une réalité plus complexe car les milieux sont très hétérogènes et les conditions locales ont une forte influence sur les transferts

La réalité est beaucoup plus complexe que ce schéma simple du fait des très fortes hétérogénéités locales qui peuvent coexister au sein d'un bassin versant. On peut ainsi déterminer 6 points clés du milieu à analyser pour prendre en compte cette hétérogénéité.

1- Les caractéristiques de la couche de surface et le temps de résidence de l'eau dans cette zone riche en matière organique, et où l'activité biologique est intense présentent une première possibilité de transformations des polluants, notamment celles permettant l'épuration de l'eau (absorption par les végétaux, dénitrification, dégradation des produits phytosanitaires ...).

2- L'impact de la forme du bassin versant sur la vitesse des transferts : l'intensité de la pente sur un versant et le relief jouent sur la proportion de l'eau qui va être transférée latéralement, tant dans les couches altérées que dans les couches superficielles du sol. Ainsi, la nappe sur un bassin versant encaissé aura une amplitude de variation assez comparable à celle d'un bassin versant plat mais avec des gradients hydrauliques différents.

Les conséquences seront donc différentes : la vitesse de l'eau et le renouvellement de l'eau du bassin versant sera plus grand sur le bassin versant encaissé que sur le bassin versant plat.

3- La profondeur du substrat par rapport à la surface n'est pas constante sur l'ensemble d'un bassin versant et peut varier très localement dans sa nature et ses propriétés de transfert du fait de l'épaisseur et la porosité plus ou moins importantes des altérites. La morphologie du sous sol modifie très fortement les temps de transfert et la dynamique de la nappe mais ses hétérogénéités sont très difficiles à évaluer. La forme du versant (étirée ou large) également.

4- La prise en compte de l'occupation du sol est fondamentale pour apprécier la charge polluante dans un bassin versant. Elle implique de quantités d'engrais et de produits phytosanitaires différentes selon les cultures en place. De plus la surface des zones contributives au ruissellement varie du fait des rotations culturales, sans que cela soit stable dans le temps. Des zones sont a contrario propice à l'épuration ou jouent un rôle de dilution car elles ne sont pas ou peu amendées ou traitées (bois, landes).

5- Les aménagements anthropiques ralentissent ou accélèrent les flux d'eau et modifient parfois très fortement la vitesse et la direction des écoulements (réseaux de fossés, de drainage, de haies). Elle ne sera cependant importante que pour la part d'eau circulant à la surface ou à proximité de la surface du sol.

## Ce qu'il faut retenir : Les voies de transfert

J. Molénat, J.M. Dorioz, C. Gascuel et G. Gruau

L'infiltration de la pluie dans le sol est contrôlée par deux phénomènes :

1°) par dépassement de la capacité d'infiltration du sol, définie comme le flux maximum que le sol est en mesure d'absorber à travers sa surface. Elle dépend du type de sol (sable>limon>argileux), de son état structural (présence de mottes, croûtes de battance) et de son humidité initiale au moment d'une pluie ; elle dépend également de l'intensité des pluies (pluies de fortes intensité,...).

2°) par saturation des sols, la porosité du sol se remplissant d'eau, elle n'est plus en mesure d'absorber la pluie. Elle dépend de la structure du sol (semelle de labour, sol compacté,...) de la profondeur du sol (sol peu épais), de la position topographique (sol de bas-fonds ou de versant, à nappe proche de la surface,...) et également du cumul pluviométrique de l'averse et des averses précédentes (trains de pluies,...)

En fonction de l'intensité du ruissellement, il y a deux types d'érosion hydrique :

- diffuse (grande surface, pente faible < 3% et force de ruissellement faible),
- concentrée (ruissellement concentré en rigole ou ravinement => pluies d'orage).

• **Les écoulements de nappe**, sont les écoulements en milieu saturé, lorsque toute la porosité du milieu (que ce soit le sol, les altérites) est saturée. La nappe est alimentée par les eaux de percolation (dans la porosité du sol). La porosité du milieu influence la réactivité de la nappe aux pluies. Les écoulements de subsurface sont fonction de la position du toit de la nappe, et donc de la position topographique dans le BV.

• **La vitesse de transfert** des écoulements :

- par ruissellement dépend de la rugosité du sol et de la pente mais c'est un écoulement très rapide (il s'arrête avec la pluie).
- par écoulement vertical, dans la zone non saturée (micropores et macropores). C'est un écoulement lent fonction du type de sol, des conditions hydriques, de l'intensité des pluies et des pratiques culturales.
- par écoulement latéral, dans la zone saturée (nappe). Sa vitesse dépend du gradient hydraulique entre l'amont et l'aval, que l'on peut grossièrement estimer à partir de la pente topographique.

• **Le temps de transfert** : - en haut de versant ou zones de plateau, il est long car la distance surface du sol - nappe y est souvent importante et le gradient hydraulique faible.  
- à mi versant, il est assez court quand la pente est importante et une couche relativement imperméable est présente à faible profondeur.  
- en fond de vallée, il est court car le milieu est souvent saturé (affleurement de nappe) et présence de transferts directs.

Ces vitesses et temps de transfert sont aussi très dépendants des obstacles et des zones tampons comme les bandes enherbées, les zones humides ou les haies et talus ou des courts circuits comme les fossés, que rencontre l'eau (et les polluants) sur son passage.

## Références bibliographiques

Il y a 6 référence(s) de base ...

Afficher seulement le(s) référence(s) de base ?

Auzet, V.A., 1990, L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture. Aspects aménagements, Ministère de l'environnement- Ministère de l'agriculture et de la forêt, 39 p.

Cosandey, C., Robinson M., 2000, Hydrologie continentale, Armand Colin, Paris, 360 p.

Dorioz, J.M., Ferhi, A., 1994, Pollution diffuse et gestion du milieu agricole: transferts comparés de phosphore et d'azote dans un petit bassin versant agricole, Water Research, 28, 395-410

Merot, P., Bruneau, P., 1992, Echelle spatiale représentative d'un bassin versant sur le plan géochimique., C.R. de l'Académie des Sciences Paris, 315, 2, 1097-1103

Merot, P., Buffin, D., 1996, Essai de caractérisation de la variabilité hydrologique en Bretagne, Hydrologie dans les pays celtiques, INRA Editions, Rennes, Colloques n°79, 127-134

Ruiz, L., Aurousseau, P., Baudry, J., Beaujouan, V., Cellier, P., Curmi, P., Durand, P., Gascuel-Oudou, C., Leterme, P., Peyraud, J.L., Thenail, C., Walter, C., Conception de bassins versants virtuels : vers un outil pour l'étude de l'influence de l'organisation spatiale de l'activité agricole et du milieu physique sur les flux d'azote dans les bassins versants

... et 14 document(s) complémentaire(s)

Beaujouan, V., 2001, Modélisation des transferts d'eau et d'azote dans les sols et les nappes. Développement d'un modèle conceptuel distribué. Application à de petits bassins versants., Thèse de l'ENSA Rennes, [voir la thèse ou le résumé](#)

Beven, K., Kirkby, M.J., 1979, A physically based variable contributing area model of basin hydrology, Hydrological Sciences Bulletin, 24, 43-69

Darboux, F., 1999, Modélisation numérique et expérimentale du ruissellement, Thèse de l'Université de Rennes 1, Géosciences, 170 p.

Durand, P., Gascuel-Oudou, C., Cordier, M.O., 2002, Parametrisation of hydrological models: a review and



- lessons learned from studies of an agricultural catchment (Naizin, France), *Agronomie*, 22, 217-228
- Durand, P., Juan Torres, J.L.**, 1996, Solute transfer in agricultural catchments - the interest and limits of mixing models, *Journal of Hydrology*, 181, 1-22
- Durand, P., Merot, P., Bidois, J.**, 1999, Modélisation du transfert de nitrate dans les bassins versants ruraux : présentation et premières applications du modèle TNT1, *Pollutions diffuses: du bassin versant au littoral*, IFREMER, IFREMER, Ploufragan, 298-310
- Grimaldi, C., Viaud, V., Massa, F., Carreaux, L., Derosch, S., Régeard, A., Fauvel, Y., Gilliet, N., Roualt, F.**, mai-juin 2004, Stream nitrate variations explained by ground water head fluctuations in a pyrite bearing aquifer., *J. Environ. Qual.*, 33, p- 994-1001
- Kao, C.**, 2002, *Fonctionnement hydraulique des nappes superficielles de fonds de vallées en interaction avec le réseau hydrographique*, Thèse de l'ENGREF-Cemagref, Paris, 266 p.
- Kirkby, M.J.**, 1979, A physically based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69
- Lecomte, V.**, 1999, *Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Processus, déterminisme et modélisation spatiale*, Thèse de l'ENGREF, Sciences de l'eau, 202 p. + annexes
- Martin, C.**, 2003, *Mécanismes hydrologiques et hydrochimiques impliqués dans les variations saisonnières des teneurs en nitrate dans les bassins versants agricoles. Approche expérimentale et modélisation.*, Thèse de l'Université de Rennes 1, 268 p., [voir la thèse ou le résumé](#)
- Merot, P., Bruneau, P.**, 1993, Sensitivity of bocage landscape to surface runoff : application of the Beven Index, *Hydrological Processes*, 7, 167-176
- Molénat, J.**, 1999, *Rôle de la nappe sur les transferts d'eau et de nitrate dans un bassin versant agricole : Etude expérimentale et modélisation*, Thèse de l'Université de Rennes 1, Sciences de la Terre, Rennes, 249 p.
- Molénat, J., Gascuel-Oudou, C., Davy, P., Durand, P.**, 2004, How to model shallow water-table depth variations: the case of the Kervidy-Naizin catchment, France, *Hydrological Processes*, in press

[http://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ\\_Eau/CONNAISSANCES/Voies\\_de\\_transfert/](http://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_Eau/CONNAISSANCES/Voies_de_transfert/)