

B

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

- Fiche B-1 Cycle de l'azote dans le sol
- Fiche B-2 Transferts et transformations des nitrates dans les bassins versants bretons
- Fiche B-3 Variations saisonnières des concentrations en nitrate : profils normaux / profils inverses

AZOTE

PHOSPHORE

Voir Fiches B-4 à B-7

MATIERE ORGANIQUE

Voir Fiches B-8 à B-10

Voir également les autres fiches disponibles sur les thèmes suivants :

A

Processus hydrologiques dans les bassins versants

C

Temps de réponse des bassins versants

D

Les mécanismes de perturbation littorale liés aux apports terrestres de nutriments

E

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

F

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

G

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

H

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

I

Le phosphore dans le sol

J

Rôle des éléments du paysage dans le bassin versant

Glossaire

CYCLE DE L'AZOTE DANS LE SOL

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Dans le sol, l'azote se présente sous **différentes formes organiques ou minérales**.
- Le **cycle de l'azote** désigne l'ensemble des processus biogéochimiques qui conduisent au passage d'une forme de l'azote à une autre.
- L'azote dans un sol peut se trouver sous deux formes :
 - sous forme organique : la matière organique représente un volant de recharge important de l'azote.
 - sous forme minérale : **le nitrate est la forme minérale la plus stable** dans le sol en présence d'oxygène. Les stocks de nitrate dans les sols sont maximaux à l'automne.
- Les **origines des nitrates** présents dans les sols agricoles sont essentiellement les **effluents minéraux** et organiques et la **minéralisation de la matière organique**.
- Les **devenirs des nitrates** des sols sont principalement l'absorption par les plantes, la dénitrification et le lessivage vers les nappes.

LES FORMES DE L'AZOTE PRESENTES DANS LE SOL

Dans le sol, l'azote peut se présenter sous **des états très variables**, sous forme **organique ou minérale**.

L'azote organique du sol comprend :

- les résidus de culture
- l'azote organique de la biomasse microbienne
- l'azote organique de l'humus.

Les différentes formes chimiques de l'azote correspondent à des **états d'oxydation différents** (Figure 1).

Le **va-et-vient entre les formes minérales et organiques**, et au sein des formes minérales, entre les différents niveaux d'oxydation de l'azote est appelé **cycle de l'azote**.

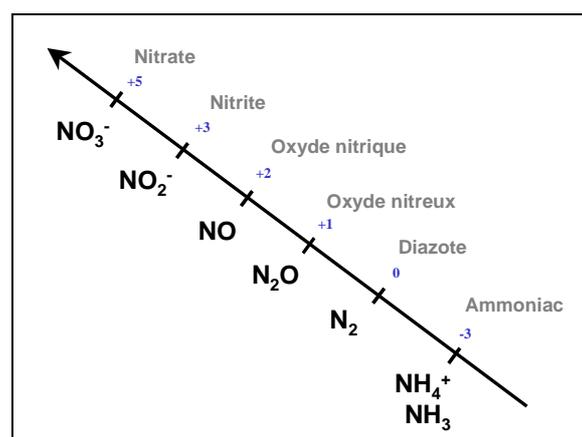


Figure 1 : Les différents états d'oxydation de l'azote.

LES PROCESSUS BIOGEOCHIMIQUES DE TRANSFORMATION DE L'AZOTE DANS LE SOL

La figure 2 présente les différentes phases du cycle de l'azote.

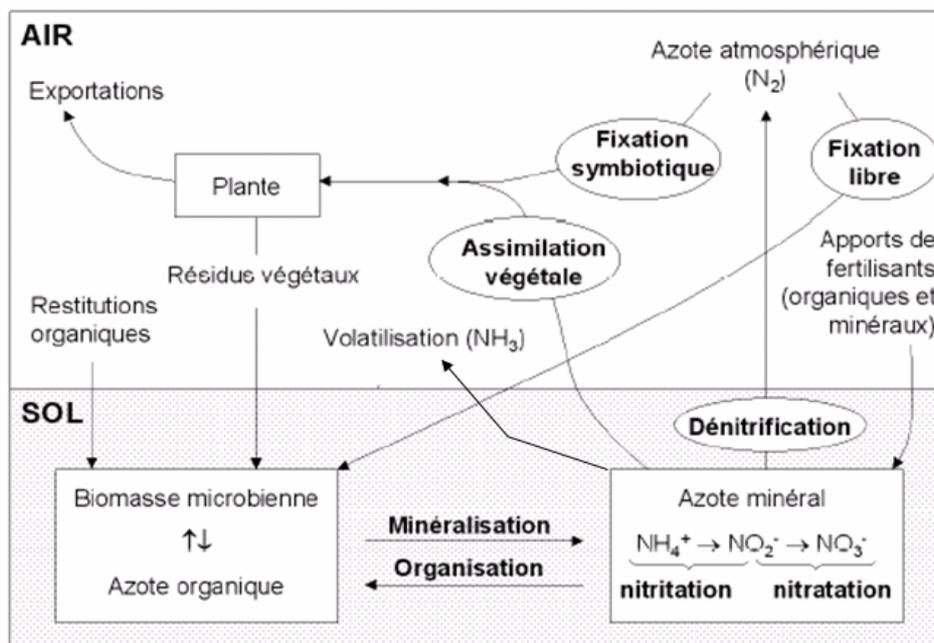


Figure 2 : Schéma du cycle de l'azote dans les sols (d'après Recous et al., 1997).

La minéralisation et l'immobilisation

- La **minéralisation** correspond à la transformation de l'azote organique en azote minéral sous forme ammonium (NH_4^+) puis de nitrates sous l'action de micro-organismes du sol.
- La **nitrification** correspond à l'oxydation biologique, par des bactéries, de l'azote ammoniacal (NH_4^+ , NH_3) en nitrate (NO_3^-).

Cette transformation est réalisée par deux familles de bactéries présentes dans les sols : *Nitrosomonas* pour la transformation de NH_4^+ en NO_2^- , puis *Nitrobacter* pour la transformation de NO_2^- en NO_3^- .

- L'**immobilisation** ou **organisation** correspond à la transformation de l'azote minéral en azote organique. Elle est réalisée par l'assimilation d'azote par les micro-organismes du sol : durant la décomposition, une partie du carbone et de l'azote est assimilée dans les tissus des micro-organismes et une partie est transformée en substance humique.

Les processus de minéralisation dépendent de :

- la composition du substrat organique et en particulier du rapport C/N,
- des conditions de température, de pH et d'humidité du milieu.

La minéralisation est d'autant plus forte que les apports d'azote sont importants et que l'activité biologique est importante. Elle est **maximale au printemps et à l'automne** lorsque les températures sont douces et le sol humide.

● La volatilisation

- La **volatilisation** correspond au passage de l'azote ammoniacal (NH_4^+) sous forme gazeuse (NH_3).

● La dénitrification

- La **dénitrification** désigne la réduction de l'azote nitrique (NO_3^-) en azote gazeux (N_2 , N_2O).

La dénitrification peut être biologique ou chimique. La dénitrification biologique fait intervenir de nombreuses espèces de bactéries dont *Pseudomonas agrobacterium* : l'ion nitrate est utilisé comme accepteur final d'électrons à la place de l'oxygène pour la respiration. La dénitrification conduit principalement à la libération de l'azote gazeux N_2 selon la réaction :



Les conditions nécessaires à la dénitrification sont :

- la présence de nitrate,
- un milieu anaérobie ou avec peu d'oxygène
- la présence de bactéries dénitrifiantes
- la présence de donneurs d'électrons

Les électrons proviennent de l'oxydation de la matière organique ou d'un composé minéral, ce qui conduit à définir 2 types de dénitrification :

- La dénitrification est **hétérotrophe** lorsque les bactéries responsables de l'oxydation de la matière organique utilisent le carbone organique comme source d'électrons.
La **dénitrification hétérotrophe** est optimale dans un milieu appauvri en oxygène, avec une température relativement élevée, quand la matière organique, donneur d'électrons, et les bactéries dénitrifiantes sont présentes. Ces conditions sont généralement réunies dans les trente premiers centimètres des sols **des zones de bas de versant** : la présence d'un engorgement permanent ou de longue durée induit des conditions d'anoxie. La **dénitrification est plus active en été** où la température est favorable.
- La dénitrification est **autotrophe** lorsque les bactéries utilisent des composés minéraux, tels que la pyrite (sulfure de fer FeS_2) comme source d'électrons.
La **dénitrification autotrophe** a lieu dans les **aquifères** où la pyrite est présente (Pauwels et al., 1998).

● LES FLUX ET STOCKS D'AZOTE DANS LE SOL

● Les entrées d'azote

Les apports atmosphériques :

- pluie
- fixation symbiotique d'azote atmosphérique par les espèces légumineuses : elle varie de quelques dizaines à quelques centaines de $\text{kg}\cdot\text{an}^{-1}$, selon les conditions pédoclimatiques.

La fertilisation :

- fertilisation minérale sous forme d'ammonium, de nitrate et d'urée
- fertilisation organique (pâturage, épandage)
- résidus de culture

● Les sorties d'azote

Les flux sortants sont :

- la volatilisation : jusqu'à 50% de l'azote ammoniacal est volatilisé lors des épandages de déjections animales, et jusqu'à 30 % de l'azote des engrais minéraux. Mais une grande partie retombe à quelques centaines de mètres.
- l'absorption par les plantes : l'azote est un élément indispensable pour la croissance des végétaux. Les plantes sont capables d'absorber l'ammonium (NH_4^+) et le nitrate (NO_3^-). Le prélèvement d'azote est un processus saisonnier pour la plupart des végétaux, maximal pendant la période de croissance des cultures.
- la dénitrification : 5 à 15 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ sont dénitrifiés dans les sols aérés, et jusqu'à 500 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans les zones humides. Si la réaction n'est pas menée à son terme, elle peut conduire à la libération de N_2O (oxyde d'azote), gaz polluant, en proportion variable.

● Les stocks d'azote

A l'échelle d'une parcelle:

- stock dans la matière organique du sol : 3000-5000 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$
- stock minéral dans le sol : 10-200 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$
- stock dans les plantes : 150-300 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$

● REFERENCES

Pauwels H. ; Kloppmann W. ; Foucher J.C. ; Martelat A. ; Fritsche V., 1998. Field tracer test for denitrification in a pyrite-bearing schist aquifer. *Applied Geochemistry*, 13(6) : 767-778.

Recous S. ; Nicolardot B. ; Simon J.C., 1997. Le cycle de l'azote dans les sols et la qualité des eaux souterraines. In INRA (Eds), *L'Eau dans l'espace rural : Production végétale et qualité de l'eau*, Universités Francophones, pp. 193-215.

TRANSFERTS ET TRANSFORMATIONS DES NITRATES DANS LES BASSINS VERSANTS BRETONS

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Les nitrates sont transférés vers le cours d'eau via les eaux de percolation dans la zone non saturée puis via les écoulements de nappe.
- Dans la zone non saturée :
 - les transferts sont essentiellement verticaux, les nitrates circulent dans la porosité du sol à une vitesse comparable à celle de l'eau (1 à 5 m.an⁻¹).
 - les nitrates lessivés vers la nappe une année donnée proviennent, pour une part seulement, de l'azote apporté pendant cette année.
- Dans la zone saturée :
 - les transferts sont essentiellement latéraux, avec des temps de transferts longs et variables (de quelques jours à plusieurs années) ;
 - les nitrates sont peu réactifs, excepté dans les zones d'interaction avec le sol (dénitrification dans les zones de bas de versant, prélèvement par la végétation en période de hautes eaux) ou avec la roche mère (dénitrification dans la nappe profonde en présence de pyrite) ;
 - les concentrations dans la nappe sont souvent stratifiées verticalement ou latéralement. La compartimentation chimique dépend de la variation dans l'espace des propriétés du milieu.

TRANSFERT ET TRANSFORMATIONS DES NITRATES DANS LA ZONE NON SATURÉE

 La zone non saturée correspond à la zone située en surface, que la nappe n'atteint pas et dont une partie de la porosité seulement est remplie d'eau. Selon les bassins versants et la position topographique considérée, la zone non saturée est constituée par le sol et/ou l'altérite (voir fiche A-1).

Les processus

Dans la zone non saturée, et en particulier dans l'horizon organique du sol, les différentes formes de l'azote (NO₃⁻, NH₄, NH₃, N₂O, NO₂) sont impliquées dans les cycles biologiques (Figure 2 et voir fiche B-1).

Les nitrates (NO₃⁻), très solubles et forme la plus stable de l'azote minéral dans les sols, sont transférés dans la zone non saturée par les eaux de percolation, en explorant toute la porosité.

Le transfert des nitrates dans la zone non saturée, met en jeu :

- Un « **effet piston** » pour l'essentiel des nitrates : la vitesse d'avancement correspond au rapport du flux d'eau percolée (drainage) et de la porosité du sol efficace pour les transferts ;
- Un **phénomène de dispersion d'une partie des nitrates** au cours de la progression dans le sol : à chaque volume poral de sol ajouté, la concentration du pic diminue (Figure 1).

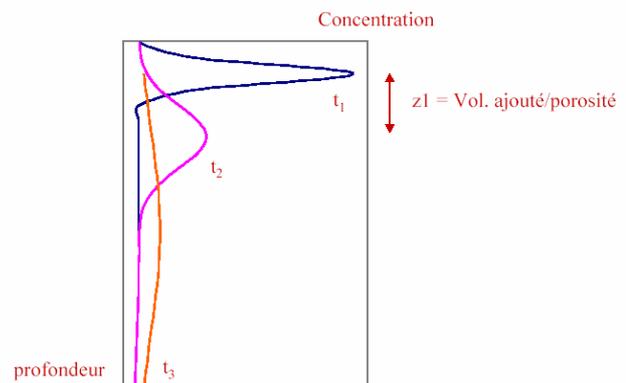


Figure 1 : Erosion du pic de concentration en nitrate dans la zone non saturée au cours du temps.

● La dynamique des transferts

Les nitrates sont transférés à une **vitesse comparable à celle de l'eau de percolation** (voir fiche A-2) :

- les écoulements sont essentiellement verticaux,
- les **transferts sont lents et de l'ordre de 1 à 5 m.an⁻¹ dans les sols bretons** (Gascuel-Odoux et Mérot, 1986 ; Legout, 2003).
- Ce schéma doit cependant être nuancé car il existe dans le sol des phénomènes ou des mécanismes qui confèrent une inertie à la dynamique de l'azote responsable de **temps moyens de résidence** (voir fiche C-1 et C-3) **relativement longs** (de l'ordre de plusieurs années). En particulier, une partie de l'azote apporté peut se réorganiser au sein de la matière organique (Figure 2). Les nitrates lessivés une année donnée proviennent donc pour une part de l'azote apporté cette année là. Ce dernier est surtout consommé par la végétation et réorganisé au sein de la matière organique du sol tant que les bilans ne sont pas fortement excédentaires : l'azote apporté au sol une année donnée se retrouve dans les eaux de lessivage pendant les 5 à 10 années qui suivent.

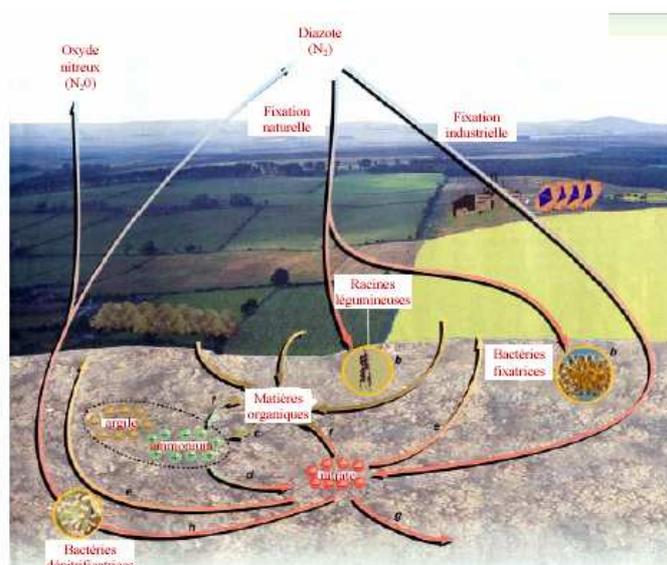


Figure 2 : Le cycle de l'azote (d'après Mariotti, 2002)

- Le sol n'est pas un continuum parfait : la taille et l'arrangement des pores créent différents compartiments dans lesquels les nitrates peuvent soit se stocker, soit circuler. Les échanges entre ces différents compartiments contribuent aussi à l'inertie de la dynamique de l'azote.

● Les facteurs de contrôle

- **Le volume et la distribution des pluies efficaces** au cours de l'année influencent le volume de la recharge de la nappe et donc les flux d'azote.
- **La température** influence les biotransformations de l'azote. Un été chaud et sec augmente fortement la minéralisation et le stock de nitrate dans les sols à la fin de l'été.
- **L'excédent d'azote**
- **La teneur en matière organique** de l'horizon de surface :
 - La teneur en matière organique est un **facteur de contrôle de la stabilité structurale** des sols. Elle détermine l'évolution de la structure de la couche de surface, et donc de la capacité d'infiltration. Elle est comprise entre 20 à 70 g.kg⁻¹ à l'échelle régionale (Walter et al., 1995),
 - Les matières organiques jouent un rôle majeur dans le cycle de l'azote.
- **Le type et la profondeur du sol** conditionnent la réserve en eau du sol, les vitesses de transferts et la recharge de la nappe. La profondeur du sol présente une grande variabilité locale et est difficile à apprécier (Walter et al., 1996).

● TRANSFERT ET TRANSFORMATIONS DES NITRATES DANS LA ZONE SATURÉE

● La **zone saturée** correspond à la zone occupée par la nappe. Elle est constituée par deux types de milieux, la roche mère et l'altérite, dans l'essentiel du bassin. En bas de versant, elle comprend aussi le sol car la nappe peut remonter vers les horizons superficiels (*voir fiche A1*).

● Les processus

Le **cheminement des nitrates dans la zone saturée est comparable à celui de l'eau** (*voir fiche A-2*) : les transferts sont essentiellement latéraux. Des **phénomènes de dispersion** des nitrates se produisent au sein de la nappe.

Les nitrates sont moins réactifs que dans la zone non saturée. Mais des **processus de transformation des nitrates** se produisent dans la nappe, **en interaction avec le sol, ou la roche mère** (Figure 3) :

- En bas de versant, en période de hautes-eaux, la nappe est située à faible profondeur et peut atteindre les horizons racinaires : une part de l'eau et des nitrates de la nappe superficielle peut être prélevée par la végétation ;
- Au niveau des zones humides de bas de versant, la saturation en eau durant une grande partie de l'année donne à ce compartiment des propriétés réductrices et permet la réduction chimique des nitrates de la nappe en azote gazeux par **dénitrification hétérotrophe** (*voir fiche B-1*) (Bidois, 1999 ; Mérot et al., 2003).
- Des processus de **dénitrification autotrophe** en présence de pyrite ont été mis en évidence dans les eaux de nappe profonde circulant dans la roche mère fissurée (Pauwels et al., 1998). L'occurrence de ces processus n'est pas systématique mais ils sont souvent rencontrés dans le contexte armoricain, dans des bassins versants sur schiste comme sur granite (Martin, 2003).

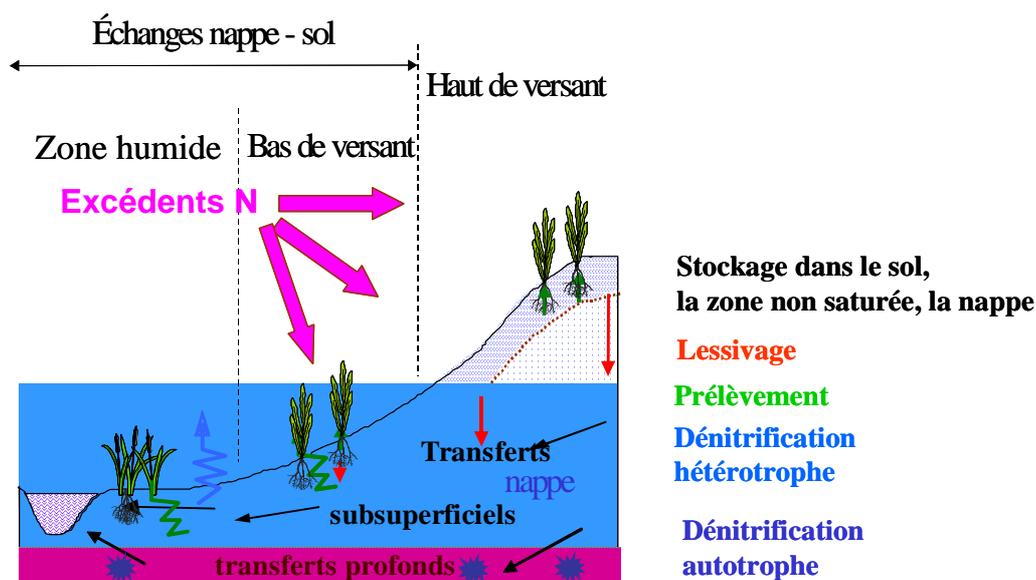


Figure 3 : Chemins de l'eau et transformations d'azote associées dans un bassin versant sur socle (Durand P. comm. Pers.)

● La dynamique des transferts

Les vitesses de transfert des nitrates dans la nappe sont comparables aux vitesses de transfert de l'eau : les transferts sont lents et hétérogènes (de quelques jours à plus d'une dizaine d'années), avec des vitesses plus rapides dans la partie superficielle de la nappe que dans la partie profonde (voir fiche A-2).

Ce schéma doit être modulé par les processus de stockage des nitrates dans certaines zones des aquifères qui augmentent les temps de transferts.

● La compartimentation chimique de la nappe

La variabilité spatiale des propriétés hydrologiques des milieux physiques et la localisation des processus biogéochimiques de transformation de l'azote introduisent une compartimentation chimique au sein de la zone saturée, de l'amont vers l'aval et de la surface vers la profondeur.

En général, deux zones sont distinguées (Figure 4) :

- la frange superficielle de la nappe (jusqu'à 15-20 m de profondeur) située dans les altérites et où les écoulements sont relativement rapides. Sa composition chimique est le reflet de pratiques agricoles relativement récentes dans le bassin versant.
- la nappe profonde, située à plusieurs dizaines de mètres de profondeur, où les écoulements sont plus lents. Les eaux sont plus anciennes, la composition chimique est le reflet de pratiques agricoles relativement anciennes. Des processus de dénitrification autotrophe peuvent y avoir lieu, contribuant à la diminution des concentrations en nitrate.

Lorsqu'il existe une zone humide avec une nappe à faible profondeur, le bas de versant constitue un compartiment faiblement chargé en nitrate du fait des processus de dénitrification hétérotrophe.

La nappe présente différents niveaux de concentration en nitrate de l'amont vers l'aval et de la surface vers la profondeur. Lorsque la nappe fluctue de façon saisonnière, les compartiments sont mobilisés en quantité différente dans l'alimentation du réseau hydrographique (Figure 4):

- la partie superficielle de la nappe (la nappe de versant), contribue de manière plus importante en hiver qu'en été. Ces mécanismes sont particulièrement importants en Bretagne où les oscillations saisonnières sont marquées.
- La nappe profonde contribue majoritairement en période d'été.
- La dénitrification dans les zones humides est active au printemps et en été.

La variation intra-annuelle de la contribution relative des différents compartiments, avec des caractéristiques de teneur en nitrate propres, explique les variations saisonnières des concentrations en nitrate dans les cours d'eau (voir fiche B-3).

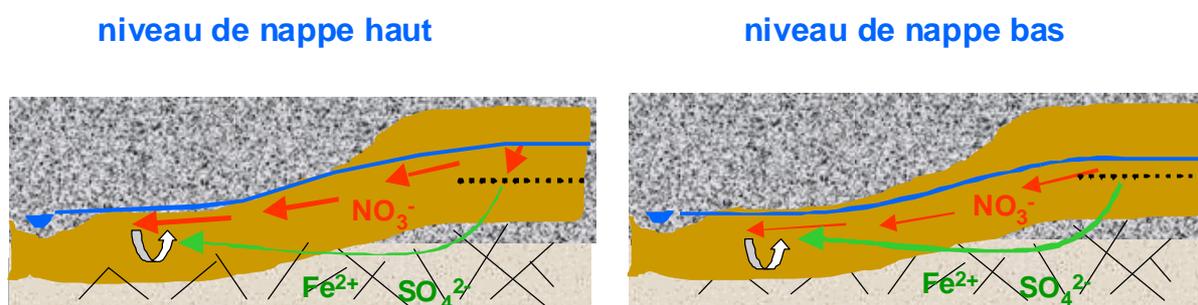


Figure 4 : Compartimentation chimique de la nappe dans le bassin de Kervidy-Naizin (Morbihan) : en hiver, la contribution de la partie superficielle de la nappe (<15-20 m), à forte concentration en nitrate, est dominante ; en été, cette contribution est relativement plus faible, au bénéfice d'une eau à concentration faible voire nulle venant de la partie profonde de la nappe (> 15-20 m), où s'opèrent des processus de dénitrification autotrophe (d'après Gascuel-Oudoux et al., 2004)

 **REFERENCES**

Bidois J., 1999. Aménagement de zones humides ripariennes pour la reconquête de la qualité des Eaux : expérimentation et modélisation. Thèse de l'Université de Rennes 1. 214p.

Gascuel-Oudoux C. ; Aquilina L. ; Martin C. Molénat J., 2004. Modèles hydrologiques et temps de réponse. In Savoirs et Savoir-faire sur les bassins versant. Pollution de l'eau et dynamique de restauration de sa qualité en milieu rural. Vannes, 20-22 avril 2004. p 195-203.

Gascuel-Oudoux C. ; Mérot P., 1986. Variabilité du transfert de l'eau dans le sol : utilisation du traçage et analyse géostatistique. Journal of Hydrology 89 : 93-107.

Martin C. 2003. Mécanismes hydrologiques 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. 265p.

Mérot P. ; Molénat J. ; Gascuel-Oudoux C. ; Durand P. ; Kao C. ; Arlot M.P. ; Nédélec Y. ; Chaumont C. ; Pinay G. ; Curmi P. ; Esneault C. ; Ruiz L. ; Beaujouan V. ; Bariuso E. ; Burel F. ; Baudry J. ; Hubert-Moy L. ; Levasseur J. ; Clément B. ; Hollier-Larousse A. ; Walter C., 1999. TY-FON : Typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse. Rapport de synthèse de deuxième année, Mars 1999, 34 p. + annexes.

Mariotti A., 1998. Nitrate, un polluant de longue durée. Pour la Science, 249, 60-65.

Molénat J. ; Gascuel-Oudoux C., 2002. Modelling flow and nitrate transport in groundwater for the prediction of water travel times and of consequences of land use evolution on water quality. Hydrological Processes, 16 :479-492.

Pauwels H. ; Kloppmann W. ; Foucher J.C. ; Martelat, A. ; Fritsche V. 1998. Field tracer test for denitrification in a pyrite-bearing schist aquifer. Applied Geochemistry, 13(6) : 767-778.

Walter C., Bouedo T. et Aurousseau P., 1995. Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport final de la convention d'étude entre le Conseil Régional de Bretagne, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et l'ENSAR, 30 pp.

Walter C., Curmi P., Gascuel-Oudoux C., 1996. Pertinence du découpage pédologique pour l'estimation spatiale des propriétés physiques du sol. Validation à l'échelle d'un bassin versant. In Etude des phénomènes spatiaux en agriculture, INRA Edition, 97-110.

VARIATIONS SAISONNIÈRES DES CONCENTRATIONS EN NITRATE : PROFILS NORMAUX / PROFILS INVERSÉS

DEFINITIONS

Les termes de profils normaux et de profils inversés renvoient à deux grands types de dynamiques intra-annuelles des concentrations en nitrate à l'exutoire des bassins versants (Figure 1).

Profils normaux

Les concentrations en nitrate sont maximales en hiver et minimales en été.

Profils inversés

Les concentrations en nitrate sont maximales en été et minimales en hiver.

Les contrastes entre les concentrations hivernales et les concentrations estivales sont plus ou moins forts et se traduisent par des profils plus ou moins marqués.

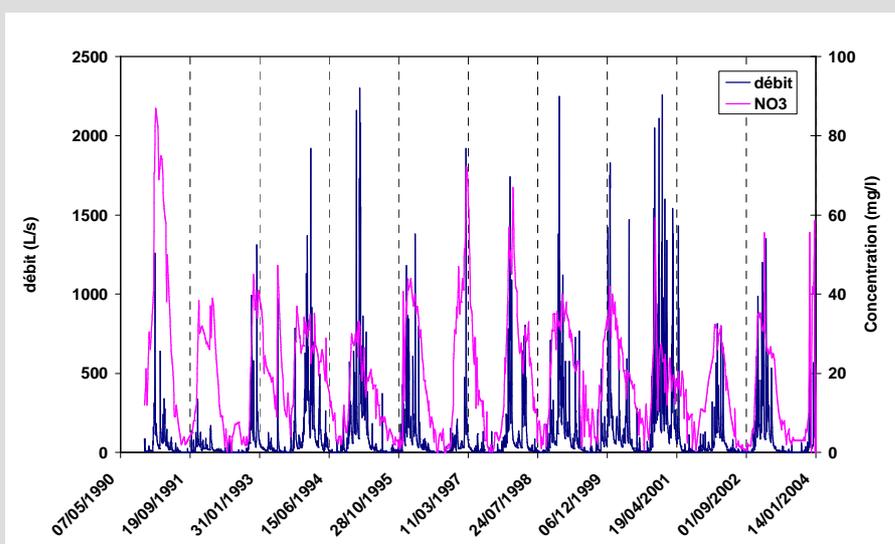
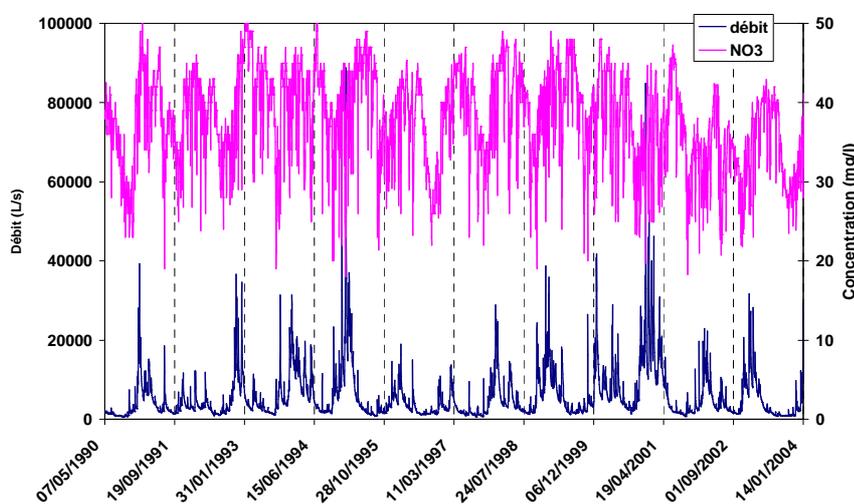


Figure 1 :
Exemple de
"profil normal"
(BV de la Chèze, 35)

Figure 2 :
Exemple de
"profil inversé"
(BV de l'Elorn, 29)



CE QU'IL FAUT RETENIR

- En Bretagne, la plupart des bassins versants présentent des profils de concentration en nitrate « normaux », avec des concentrations maximales en hiver et des concentrations minimales en été.
- Les variations saisonnières des concentrations en nitrate dans les cours d'eau des bassins versants bretons sont liées à l'interaction entre 3 facteurs :
 - les fluctuations du toit de la nappe au cours des saisons,
 - l'hétérogénéité spatiale de la teneur en nitrate de la nappe,
 - la saisonnalité des processus de dénitrification.

La fluctuation du toit de la nappe est un phénomène commun à tous les bassins bretons (ce toit de la nappe baisse en été). Par contre, la localisation et l'extension des zones de dénitrification, ainsi que l'hétérogénéité spatiale des concentrations en nitrate dans la nappe sont variables entre les bassins.

- Ces variations saisonnières ont été mises en relation avec les fonctionnements hydrologiques et hydrochimiques dans 3 bassins versants de recherche :
 - 2 bassins (Kervidy-Naizin et Kerrien) présentent des profils normaux : la baisse des concentrations en été s'explique par la contribution majoritaire d'eaux dénitrifiées dans la nappe en profondeur et/ou dans la zone humide de bas de versant.
 - 1 bassin versant (Kerbernez) présente des profils inversés. Dans ce cas :
 - Le minima en hiver s'explique par la forte contribution de la nappe superficielle plus faiblement chargée en nitrate que la nappe profonde, grâce à la réduction de l'excédent du bilan agronomique dans le bassin au cours des 10 dernières années.
 - Le maxima en été s'explique par la contribution de la nappe profonde fortement chargée en nitrate et non diluée par la contribution des eaux dénitrifiées de la zone humide puisque celle-ci est peu étendue.

EXEMPLES : FONCTIONNEMENTS HYDROLOGIQUES ET HYDROCHIMIQUES DE BASSINS A PROFILS NORMAUX

Bassin versant de Kervidy-Naizin (Molénat et al., 2002)

Répartition spatiale des teneurs en nitrate dans la nappe

Trois domaines de concentration en nitrate ont été mis en évidence (Figure 1) :

1. la nappe superficielle de versant et de plateau (jusqu'à 10–15 m de profondeur) fortement chargée en nitrate avec des concentrations de plus de 100 mg.l⁻¹ ;
2. la nappe superficielle de bas de versant avec des concentrations en nitrate moyennes à faibles (40-80 mg.l⁻¹), qui s'expliquent par des processus de dénitrification hétérotrophe au printemps et à l'automne ;
3. la nappe profonde (à plus de 20 m de profondeur) avec des concentrations en nitrate faibles à quasi-nulles, qui s'expliquent par des processus de dénitrification autotrophe en présence de pyrite.

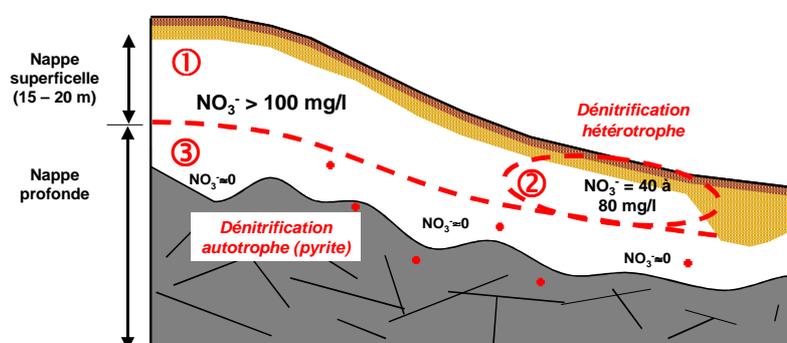
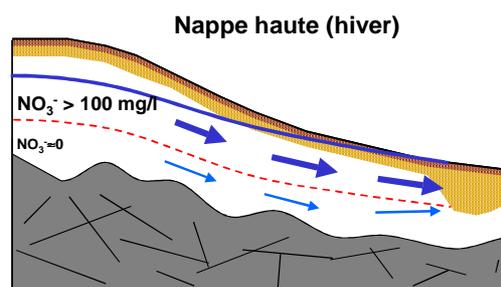


Figure 1 : Répartition spatiale des concentrations en nitrate dans la nappe du bassin versant de Kervidy-Naizin. (1) Nappe superficielle de versant et de plateau, (2) Zone humide de bas de versant, (3) Nappe profonde.

Fonctionnements saisonniers du bassin versant

En période de hautes eaux (hiver) : la nappe est haute. La contribution de la partie superficielle de la nappe, à fortes concentrations en nitrate, est dominante et entraîne de fortes concentrations en nitrate dans le cours d'eau.



En période de basses eaux (été) : la nappe est basse.

- la contribution de la nappe profonde, à faibles concentrations en nitrate, est dominante.
- les processus de dénitrification hétérotrophe dans la zone humide sont favorisés par les conditions climatiques au printemps et entraînent une diminution de la concentration en nitrate dans la partie superficielle de la nappe en bas de versant.

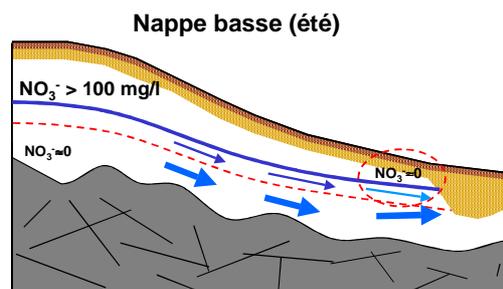


Figure 2 : Schéma fonctionnement du bassin de Kervidy-Naizin en période de nappe haute et de nappe basse. D'après Molénat et al. (2002).

● Bassins versants de Kerrien (Martin, 2003)

● Répartition spatiale des concentrations en nitrate dans la nappe

Une compartimentation amont-aval, avec deux domaines de concentrations en nitrate, a été mise en évidence (Figure 3) :

1. **la zone de plateau et de mi-versant** moyennement chargée en nitrate avec des concentrations de 60-70 mg.l⁻¹ sur les 20 m de profondeur étudiés.
2. **la zone de bas de versant**, relativement étendue dans ce bassin versant et profonde d'une dizaine de mètres, où des processus de dénitrification hétérotrophe conduisent à des concentrations de nitrate faibles (15 mg.l⁻¹)

La composition chimique de la nappe plus profonde (au-delà de 20 m) n'a pas été étudiée et les processus de dénitrification autotrophe n'ont pas été mis en évidence.

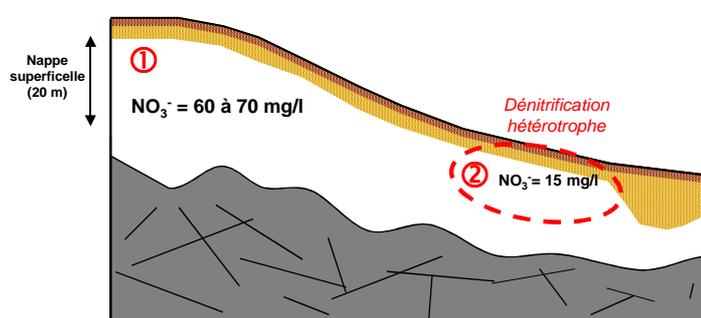
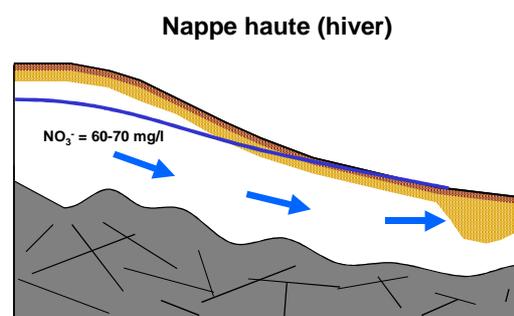


Figure 3 : Compartimentation amont-aval de la nappe dans le bassin versant de Kerrien (Finistère). D'après Martin (2003).

● Fonctionnement saisonnier du bassin versant

En période de hautes eaux (hiver) :

La nappe est haute. Les eaux circulant dans les parties les plus superficielles des domaines de mi-versant et de plateau et moyennement chargées en nitrate contribuent majoritairement à l'écoulement dans le cours d'eau. La dénitrification en bas de versant est peu active.



En période de basses eaux (été) :

La nappe est basse. Les flux de l'amont sont moins importants qu'en hiver et sont mélangés à ceux de la zone humide dénitrifiée. Il y a donc une diminution des teneurs en nitrate dans la rivière due à une contribution plus importante de la zone humide.

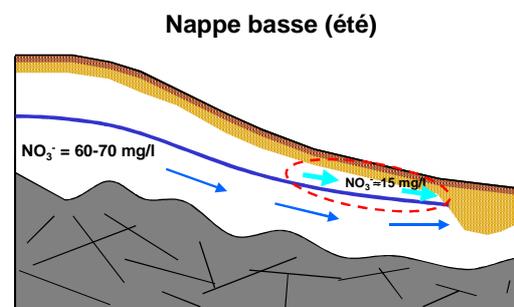


Figure 4 : Schéma fonctionnement du bassin de Kerrien en période de nappe haute et de nappe basse. D'après Martin (2003).

EXEMPLES : FONCTIONNEMENTS HYDROLOGIQUES ET HYDROCHIMIQUES D'UN BASSIN A PROFILS INVERSES

Bassins versants de Kerbernez (Martin, 2003)

Répartition spatiale des concentrations en nitrate dans la nappe

Une **compartimentation essentiellement verticale** avec deux domaines de concentration en nitrate a été mise en évidence (Figure 5) :

1. **la partie la plus superficielle** (jusqu'à 10-15 m de profondeur) moyennement chargée en nitrate, avec des concentrations de $60-70 \text{ mg.l}^{-1}$;
2. **la partie plus profonde** (entre 15 et 20 m de profondeur), plus fortement chargée en nitrate, avec des concentrations de $80-110 \text{ mg.l}^{-1}$

La **zone humide de bas de versant** est peu étendue, la **dénitrification hétérotrophe y est donc faible**.

La composition chimique de la nappe au-delà de 20 m n'a pas été étudiée et les processus de dénitrification autotrophe n'ont pas été mis en évidence.

Dans le cas de ce bassin versant, les pratiques agricoles ont été enregistrées précisément pendant plusieurs années. L'analyse de l'évolution des pratiques agricoles montre une diminution des excédents azotés à l'échelle du bassin, qui expliquerait la plus faible concentration en nitrate de la partie la plus superficielle de la nappe.

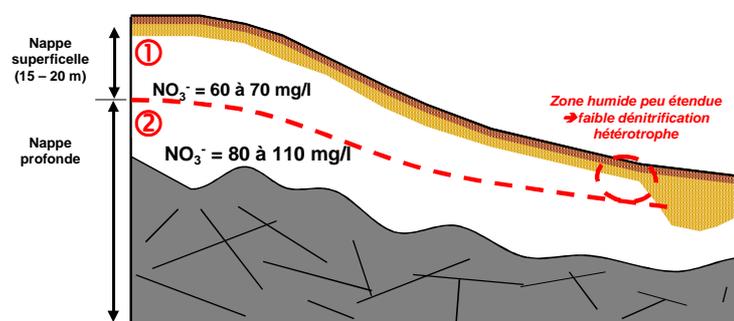
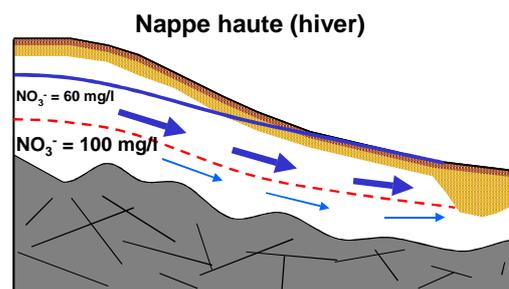


Figure 5 : Compartimentation spatiale de la nappe dans le bassin versant de Kerbernez (Finistère).
D'après Martin (2003).

- **Fonctionnements saisonniers du bassin versant**

En période de hautes eaux (hiver) : la nappe est haute. Les eaux circulant dans les parties les plus superficielles des domaines de mi-versant et de plateau sont moyennement chargées en nitrate. Elles contribuent majoritairement à l'écoulement dans le cours d'eau.



En période de basses eaux (été) : la nappe est basse.

- la contribution de la nappe profonde, à fortes concentrations en nitrate, est dominante.
- les processus de dénitrification hétérotrophe dans la zone humide sont favorisés par les conditions climatiques au printemps mais la contribution de la zone humide à l'écoulement du cours d'eau est faible.

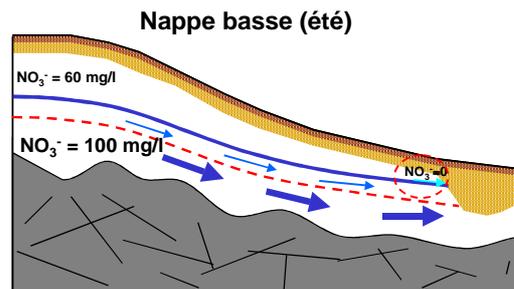


Figure 6 : Schéma fonctionnement du bassin de Kerbernez en période de nappe haute et de nappe basse. D'après Martin (2003).

REFERENCES

Martin C., 2003. Mécanismes hydrologiques et hydrochimiques impliqués dans les variations saisonnières des teneurs en nitrate dans les bassins versant agricoles. Approche expérimentale et modélisation. Thèse de l'Université de Rennes 1, 267p.

Molénat J. ; Gascuel-Oudoux C., 2002. Modelling flow and nitrate transport in groundwater for the prediction of water travel times and of consequences of land use evolution on water quality. Hydrological Processes, 16 : 479-492.



GLOSSAIRE (FICHES B : AZOTE)

A

AUTOTROPHE

Voir à [dénitrification](#)

C

CYCLE DE L'AZOTE

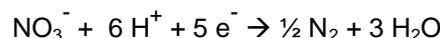
Ensemble des processus biogéochimiques qui conduisent au passage d'une forme de l'azote à une autre.

D

DENITRIFICATION

Réduction de l'azote nitrique (NO_3^-) en azote gazeux (N_2O , N_2).

La dénitrification peut être biologique ou chimique. La dénitrification biologique fait intervenir de nombreuses espèces de bactéries dont *Pseudomonas agrobacterium* : l'ion nitrate est utilisé comme accepteur final d'électrons à la place de l'oxygène pour la respiration. La dénitrification conduit principalement à la libération de l'azote gazeux N_2 selon la réaction :



Les conditions nécessaires à la dénitrification sont :

- la présence de nitrate,
- un milieu anaérobie ou avec peu d'oxygène
- la présence de bactéries dénitrifiantes
- la présence de donneurs d'électrons

Les électrons proviennent de l'oxydation de la matière organique ou d'un composé minéral, ce qui conduit à définir 2 types de dénitrification :

- La dénitrification est **hétérotrophe** lorsque les bactéries responsables de l'oxydation de la matière organique utilisent le carbone organique comme source d'électrons. La dénitrification hétérotrophe est optimale dans un milieu appauvri en oxygène, avec une température relativement élevée, quand la matière organique, donneur d'électrons, et les bactéries dénitrifiantes sont présentes. Ces conditions sont généralement réunies dans les trente premiers centimètres des sols des zones de bas de versant : la présence d'un engorgement permanent ou de longue durée induit des conditions d'anoxie. La dénitrification est plus active en été où la température est favorable.
- La dénitrification est **autotrophe** lorsque les bactéries utilisent des composés minéraux, tels que la pyrite (sulfure ferreux FeS_2) comme source d'électrons.

H

HETEROTROPHE

Voir à [dénitrification](#)

I

IMMOBILISATION DE L'AZOTE

Transformation de l'azote minérale en azote organique. Elle est réalisée par l'assimilation d'azote par les micro-organismes du sol : durant la décomposition, une partie du carbone et de l'azote est assimilée dans les tissus des micro-organismes et une partie est transformée en substance humique.

Aussi appelée organisation de l'azote.

M

MINÉRALISATION DE L'AZOTE

Transformation de l'azote organique en azote minéral sous forme ammonium (NH_4^+) sous l'action de micro-organismes du sol.

Les processus de minéralisation dépendent de :

- la composition du substrat organique et en particulier du rapport C/N,
- des conditions de température, de pH et d'humidité du milieu

La minéralisation est d'autant plus forte que les apports d'azote sont importants.

N

NITRIFICATION DE L'AZOTE

Oxydation biologique par des bactéries de l'azote ammoniacal (NH_4^+ , NH_3) en nitrate (NO_3^-).

Cette transformation est réalisée par deux familles de bactéries présentes dans les sols :

Nitrosomonas pour la transformation de NH_4^+ en NO_2^- , puis *Nitrobacter* pour la transformation de NO_2^- en NO_3^- .

O

ORGANISATION DE L'AZOTE

Voir à immobilisation.

T

TEMPS MOYEN DE RESIDENCE

Temps moyen qu'une molécule d'eau ou de soluté passe dans le bassin versant. En supposant que l'écoulement est homogène dans le temps et dans l'espace, le temps moyen de résidence de l'eau dans un réservoir est donné par la formule théorique suivante :

$$T = \frac{V}{Q} \quad \text{avec, } T \quad \text{temps moyen de résidence}$$

V volume du réservoir
 Q débit du réservoir

Cette notion est aussi utilisée en océanographie.

V

VOLATILISATION DE L'AZOTE

Passage de l'azote ammoniacal (NH_4^+) sous forme gazeuse (NH_3).

Z

ZONE NON SATUREE

- Système à 3 phases (solide, liquide, gaz) où seule une partie de la porosité est remplie d'eau, le reste étant occupé par de l'air.
- Zone située au dessus de la zone saturée, que la nappe n'atteint pas en permanence et dont une partie de la porosité seulement est remplie d'eau. Selon les bassins versants et la position topographique considérée, la zone non saturée est constituée par le sol et/ou l'altérite.

ZONE SATUREE

- Système à deux phases (solide, liquide) où tous les pores sont remplis d'eau.
- Zone située en profondeur, que la nappe occupe pendant toute l'année et dont toute la porosité est remplie par de l'eau en permanence.