



La démarche Territ'EAU

Influence des éléments du paysage sur les transferts de l'eau et des polluants associés dans un bassin versant sur socle

Bilan des connaissances applicables dans le contexte pédoclimatique breton

Septembre 2009

Introduction :

Un manuel en ligne pour comprendre la qualité des eaux de surface et ses déterminants

La dégradation de la qualité de l'eau varie selon le bassin versant (milieu physique, structure paysagère, système agricole), l'histoire agricole passée et actuelle du bassin versant (stock de nutriments ou de polluants constitué, pratiques actuelles) et le régime climatique (climat des années antérieures, de l'année, caractéristiques de l'averse). Pour identifier les facteurs de dégradation de la qualité de l'eau, il est donc nécessaire :

- 1) **d'estimer les sources d'éléments polluants**, c'est-à-dire les apports et les bilans d'excédents, année par année sur le bassin versant pour les polluants dont on sait que leur présence dans les eaux résulte d'apports (nitrate, phosphore ou pesticides); pour les polluants dont la présence dans l'eau correspond plus à des biotransformations et à un déplacement au sein du bassin qu'à des apports (matières organiques), on cherchera à localiser les sources et conditions sujettes à leur émission dans l'eau.
- 2) **de déterminer l'importance relative des différents chemins que prennent l'eau et les polluants** qui lui sont associés sur un territoire (ruissellement, écoulement dans la nappe, transfert via les fossés)
- 3) **de chiffrer ce qui est stocké dans le bassin versant**, combien et où, car la restitution des stocks peut prendre le pas, en quantité, sur les apports annuels (les stocks de nitrates dans les nappes sur certains bassins versants sont très supérieurs aux apports annuels),
- 4) **enfin d'évaluer les quantités potentiellement épurées** dans le bassin versant, soit par stockage, soit par biotransformation *via* les différentes zones tampons disséminées sur un territoire (zones humides, haies, fossés peu circulants, bandes enherbées ...).

Ce référentiel est en quelque sorte un manuel en ligne à destination des techniciens de terrains pour leur donner des clés de compréhension de la qualité de l'eau. Il est structuré en deux parties qui font chacune l'objet de plusieurs chapitres.

Dans la première partie ; les différentes pollutions de l'eau, leurs natures, leurs origines et leurs voies de transfert depuis le bassin versant jusqu'au cours d'eau sont abordées. Cette première partie a pour objectif d'expliquer le pourquoi de la pollution des eaux de surface, sa dynamique temporelle, ceci pour comprendre les spécificités de ces pollutions. **On ne peut aborder les nitrates, comme les phytosanitaires, ou comme le carbone organique dissous. Ils ne sont pas stockés au même endroit, l'eau qui les véhicule n'a pas suivi le même chemin.**

Dans la seconde partie ; le rôle des éléments intersticiels, éléments linéaires ou surfaciques qui séparent les espaces cultivés, que l'on appelle ici éléments du paysage, est abordé. Il s'agit en premier lieu de la délimitation du cours d'eau et du réseau hydrographique fonctionnel, des zones humides, des bandes enherbées qui se développent actuellement le long des cours d'eau, des bordures de champs qui peuvent être des haies ou/et des talus. Ces éléments ont un rôle sur la qualité de l'eau. Ils font l'objet d'une attention croissante. C'est le cas des zones humides qui sont actuellement inventoriées dans le cadre des PLU (Plan local d'urbanisme). C'est aussi le cas des bandes enherbées et des bordures de champs qui sont des corridors écologiques, et s'inscriront donc dans le cadre de l'élaboration des trames vertes et bleues (cf opération Breiz Bocage). **Le rôle des éléments du paysage sur la qualité de l'eau est parfois surestimé, les critères pour les apprécier mal connus, la confusion avec d'autres enjeux tels que la biodiversité, très fréquente.**

Un manuel en ligne pour comprendre la qualité des eaux de surface et ses déterminants

- **Partie 1 : Circulation de l'eau et des polluants dans un bassin versant agricole.**

Chapitre 1 : Les pollutions de l'eau dans les bassins versants agricoles : natures, sources et mécanismes de transfert.

Chapitre 2 : Les voies de transfert : circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle.

- **Partie 2 : Les éléments du paysage et leur rôle sur la qualité de l'eau.**

Chapitre 3 : Les fossés et cours d'eau.

Chapitre 4 : Les zones humides.

Chapitre 5 : Les bandes enherbées.

Chapitre 6 : Les haies et autres bordures de champs.

Ces chapitres sont les bases fondamentales pour déterminer les cultures et les pratiques à risques sur un territoire, l'effet de leur arrangement spatial sur le transfert des éléments polluants, le rôle des éléments du paysage.

Ce manuel a vocation à s'étoffer pour englober les enjeux écologiques qui sont abordés dans le cadre de la directive cadre sur l'eau, en abordant notamment la continuité de la rivière, et plus généralement des corridors fluviaux, la qualité des habitats aquatiques. Ces enjeux sont aussi au cœur des textes réglementaires relatifs aux trames vertes et bleues qui sont en cours d'élaboration.

1^{ère} partie :

**Circulations de l'eau
et des polluants dans un bassin
versant sur socle**

Chapitre 1

Les pollutions de l'eau dans les bassins versants agricoles : natures, sources et mécanismes de transfert

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

Généralités: qualité de l'eau, multiplicité des polluants et des comportements

II- Produits phytosanitaires

- 1- Nature chimique des produits phytosanitaires
- 2- Le transfert des produits phytosanitaires

III- Nitrates

- 1- Nature chimique
- 2- Le transfert des nitrates
- 3- Sources et stock de nitrates

IV- Matière organique dissoute

- 1- Nature de la matière organique
- 2- Le transfert de la matière organique
- 3- Le stock de matière organique

V- Phosphore

- 1- Nature chimique
- 2- Le transfert du phosphore
- 3- Le stock de phosphore

VI- Métaux lourds

- 1- Nature chimique
- 2- Le transfert des métaux lourds
- 3- Le stock de métaux lourds

VII- Conclusion: Les polluants les plus étudiés ; nitrates et produits phytosanitaires

Ce qu'il faut retenir.

Généralités: qualité de l'eau, multiplicité des polluants et des comportements

La qualité de l'eau est généralement évaluée par deux aspects :

- la **qualité physico-chimique**,
- la **qualité écologique**.

Ceci pour prendre en compte trois exigences majeures des sociétés humaines : 1) disposer d'eau en quantité suffisante pour l'alimentation, les usages domestiques, industriels et agricoles, 2) faire en sorte que cette eau soit sans danger pour ces différents usages, 3) préserver les milieux aquatiques incluant la faune et la flore qui y vivent.

Des textes réglementaires fixent les teneurs maximales à respecter pour les eaux brutes. Des valeurs guides sont aussi proposées pour respecter la faune et la flore présentes dans les écosystèmes aquatiques et maintenir le bon état fonctionnel des rivières. En Bretagne, l'accent est mis sur les polluants d'origine agricole qui sont certainement les sources de pollution parmi les plus importantes dans cette région (Observatoire de l'eau, 2004). Le tableau 1 donne quelques valeurs seuils indiquées dans la réglementation.

Tableau 1 : Limites de qualité des eaux brutes destinées à la fabrication d'eau potable (Arrêté du 11 janvier 2007) et objectifs de qualité donnés par la DCE (DCE n°2005-12 du 28/07/05 décret relatifs aux objectifs qualité des masses d'eau superficielles). Les concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs citées ou comprises dans les limites indiquées.

| Paramètre | Valeur limite impérative | Valeur guide pour les eaux superficielles (même unité) |
|--------------------------|--|--|
| Nitrates NO ₃ | 50 mg/l | 25 mg/l |
| Nitrites NO ₂ | 0,1 mg/l | 0,05 mg/l |
| Ammonium NH ₄ | 0,5 mg/l | |
| Produits phytosanitaires | 0,1 µg/l par substance 0,5 µg/l pour le total des substances mesurées | |
| Phosphore | 5 mg/l de P ₂ O ₅ | 0,4 mg/l de P ₂ O ₅ |
| Cuivre | 1 mg/l de Cu | 0,02 mg/l de Cu |
| Zinc | 5 mg/l de Zn | 0,5 mg/l de Zn |

Les substances susceptibles de polluer les eaux des bassins versants agricoles se regroupent en deux catégories : 1) les substances utilisées en agriculture pour amender le sol (engrais, déjections sources de nitrates mais aussi de métaux lourds, de phosphore, de bactéries, ...) ou pour protéger les cultures (produits phytosanitaires et adjuvants associés) ; 2) les substances naturellement présentes dans les sols, et susceptibles de se solubiliser et d'être transférées dans les eaux (matières organiques). Les substances en question ne sont pas des polluants au départ, mais c'est leur surabondance dans les eaux qui en fait des polluants.

Les substances utilisées en agriculture et pouvant devenir des polluants de l'eau sont multiples. Ces substances atteignent d'abord le sol où leur comportement vis à vis du milieu va déterminer leur dispersion vers d'autres compartiments (air, eau). Leur proportion à polluer fortement et durablement les eaux dépend de leurs caractéristiques physico-chimiques, et notamment de leur mobilité¹ dans les compartiments sol et eau, de leur persistance si elles se dégradent, de leur temps de transfert si elles migrent vers les nappes. Ces caractéristiques, combinées avec celles du milieu, permettent la constitution d'un stock dans le sol ou la nappe. L'eau comme les polluants peuvent être caractérisés par un temps de résidence moyen (figure 1).

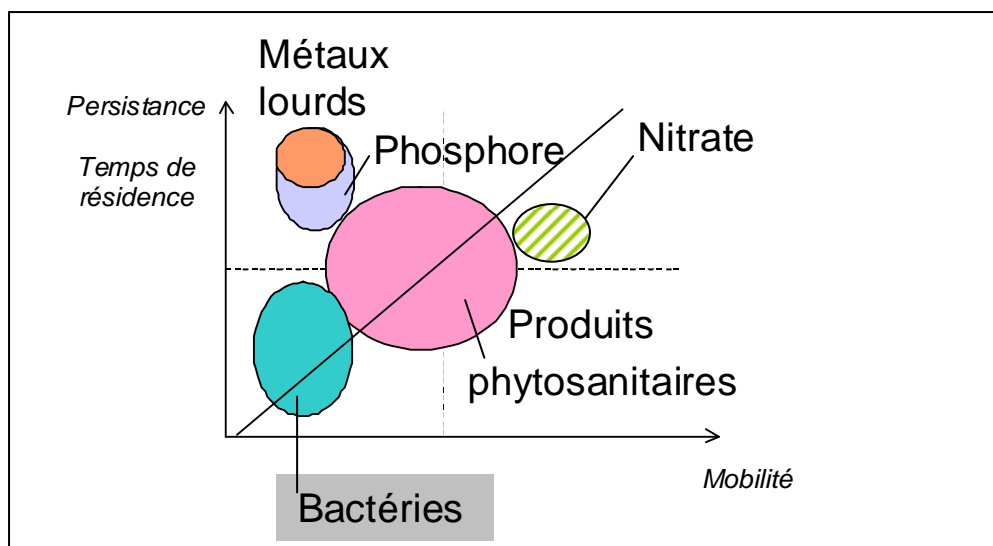


Figure 1 : En fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques, les polluants rencontrés en Bretagne sont différents en terme de mobilité, de persistance ou de temps de résidence (aire unie : dans le sol, aire hachurée : dans la nappe).

Les substances naturellement présentes dans les sols et susceptibles de devenir des polluants, parce que susceptibles d'être déplacées en grande quantité vers les eaux sont principalement les matières organiques. La mise en solution des matières organiques du sol et leur transport vers les eaux est la résultante d'un ensemble de processus de désorption-adsorption, solubilisation, dégradation, transport ..., déterminés par les conditions du milieu (température, humidité, pH, activité biologique) et les caractéristiques physiques du sol (perméabilité). Les stocks de matières organiques du sol susceptibles d'être déplacés sont principalement situés dans les zones de fonds de vallée, là où la nappe peut atteindre les horizons organiques du sol.

La résilience des cours d'eau, c'est-à-dire leur capacité à retrouver un état non pollué peut être très grande. Elle dépend de l'importance des polluants accumulés dans les sols et les nappes, des dynamiques qu'ils peuvent subir par exportation, par les cultures par exemple, ou par transfert ou biotransformation vers l'eau ou l'atmosphère.

Suivant les polluants, il y a **deux stocks à considérer** :

- le **stock du sol** est constitué par des polluants persistants, c'est à dire les polluants peu solubles et de durée de vie longue. Cette durée de vie est la résultante d'un ensemble

¹ Dans les sols, la mobilité d'une substance est mesurée par le K_{d} , souvent exprimé en valeur relative / MO par le Koc, qui représente le coefficient de distribution de cette substance entre l'eau et le sol rapporté à la teneur en matière organique du sol considéré.

de processus de rétention, déterminés par les conditions du milieu (température, humidité, pH, activité biologique). Le polluant persistant s'accumule dans le sol en grande quantité : un stock au sens strict du terme est alors constitué. C'est le cas des **métaux lourds** et du **phosphore** qui sont peu transformés et sont principalement stockés dans le sol.

- le **stock de la nappe** est constitué par les polluants solubles et persistants qui migrent en profondeur avec les eaux de pluie. Ces polluants sont ensuite évacués vers la rivière par vidange de la nappe. C'est donc une quantité qui se déplace et transite. Si un polluant est présent longtemps et de manière mesurable dans la nappe, c'est que les vitesses en jeu sont très faibles. Du fait de ce renouvellement de l'eau très lent, la quantité de polluant présent à un moment donné dans la nappe est assimilée par abus de langage à un stock.

Au final, on distingue les substances susceptibles de polluer les eaux des bassins versants agricoles suivant leur forme, leur comportement et leur temps de résidence.

Les produits phytosanitaires sont plus ou moins mobiles selon les caractéristiques des molécules. Leur persistance est variable comprise le plus souvent entre quelques jours et plusieurs mois. Il n'y a généralement pas constitution d'un stock. Les métabolites issus de la dégradation des molécules mères peuvent avoir une persistance beaucoup plus grande. Ils sont aussi par nature des polluants.

Les nitrates sont très mobiles du fait de leur forme chimique (anions). S'ils ne sont pas consommés par la végétation ou réorganisés dans la matière organique du sol, les nitrates peuvent migrer dans les nappes où ils peuvent devenir persistants (plusieurs années voir dizaines d'années). Une partie du stock peut disparaître par dénitrification dans les zones humides ou les nappes. Associés au phosphore, ils entraînent l'eutrophisation des eaux douces et sont à l'origine de la prolifération d'algues vertes sur le littoral.

La matière organique dissoute devient un enjeu pour la potabilité de l'eau dans certains bassins versants. Les matières organiques d'origine animale apportées au sol en tant que fertilisant sont pour la plus grande part rapidement minéralisées (c'est-à-dire transformées en CO₂) et ne sont donc pas impliquées dans la pollution. Les matières organiques d'origine végétale, présentes naturellement dans le sol, sont vraisemblablement à l'origine de la pollution. Ces matières organiques sont peu mobiles en règle générale, étant fixées sur la phase minérale du sol. Cependant, elles peuvent devenir mobiles lors des épisodes pluvieux, notamment dans les zones humides de fonds de vallée où se trouvent les principaux stocks.

Le phosphore est peu mobile et persistant. Tout apport excédentaire par rapport aux cultures reste dans le sol, où se constitue des stocks. Il est facilement fixé sur les particules de sol et déplacé par l'eau préférentiellement sous forme particulaire. Il détermine l'eutrophisation des eaux douces et participe à l'eutrophisation des eaux littorales, au développement de booms de cyanobactéries et d'algues dans certains estuaires et sur le littoral.

Les métaux lourds ou éléments traces métalliques (ETM) tels que le cuivre (Cu) ou le zinc (Zn), présents dans les effluents d'élevage, sont comme le phosphore, peu mobiles et très persistants : ils s'accumulent dans les sols avec des risques écotoxicologiques pour les organismes du sol et les plantes cultivées. Ils sont aussi très abondants dans le ruissellement urbain.

Les sources de pollution dans les bassins versants agricoles sont forcément diffuses. Le contrôle de telles pollutions est difficile du fait de l'impossibilité d'édicter des mesures réglementaires limitant les importations et/ou les excédents en tout lieu du bassin versant, de limiter des fuites qui sont parfois très faibles au regard des quantités appliquées.

Dans tous les cas, ces nutriments, devenus polluants de part leur quantité élevée, sont des éléments associés à l'eau même si les mécanismes régissant leurs transferts et leurs stocks dans l'environnement sont très différents. Les sections suivantes vont décrire, polluant par polluant, les formes, sources et stocks de ces différentes substances ainsi que la forme prépondérante sous laquelle elles circulent dans un bassin versant.

I. Produits phytosanitaires

1- Nature chimique des produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires comprennent une large gamme de molécules², plus ou moins solubles et mobiles selon les caractéristiques physico-chimiques des produits et notamment leur Koc³, coefficient d'affinité de la molécule vis à vis du sol. On les classe généralement en trois groupes selon leurs caractéristiques environnementales de mobilité (quantifiées par le Koc), leur persistance (quantifiée par la demi vie⁴) et les doses appliquées. On les classe aussi selon leur impact potentiel sur l'homme, par la toxicité, et sur l'écosystème, par l'écotoxicité.

2- Le transfert des produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires peuvent être transportés sous forme dissoute ou adsorbés sur les matières en suspension (MES) selon :

- les propriétés d'adsorption de la molécule sur la phase solide (c'est à dire le Koc),
- la nature et la concentration des matières en suspension présentes dans l'écoulement.

La répartition entre les deux formes de transport dépend donc de la molécule et du contexte. Hors des périodes pluvieuses, le transport s'effectue essentiellement sous forme soluble du fait de la faible charge en matières en suspension (MES) des eaux de nappe qui alimente les rivières, de la faible érosion dans le cours d'eau pendant ces périodes. Les flux correspondant à ces situations restent faibles, du fait de la faible teneur en produits phytosanitaires des nappes. Pendant les périodes pluvieuses, le transport s'effectue sous forme particulaire et dissoutes, du fait de la capacité des eaux de ruissellement à mobiliser de grandes quantités de MES, de la mise en charge des nappes superficielles. Les flux correspondant à ces situations peuvent être forts dans la mesure où les particules de surface stockent une grande partie des produits phytosanitaires.

Le transfert des pesticides est fonction :

- des quantités appliquées,
- de l'intervalle entre l'application et l'événement pluvieux important qui lui succède,

² La liste des produits homologués est disponible sur <http://e-phy.agriculture.gouv.fr>

³ Le Koc représente le coefficient de distribution entre l'eau et le sol d'une substance rapporté à la teneur en matière organique du sol considéré (these de thiollet p16 ou 20). Il mesure indirectement la mobilité d'une substance dans un sol donné)

⁴ *Demi vie* : nombre de jours nécessaires à la dégradation dans le sol de la moitié des substances actives

- des conditions environnementales (températures, humidité, activité biologique), qui accélèrent ou non la dégradation des molécules.
- des états de surface du sol et de l'état hydrique du BV.

Le risque de transfert d'un produit est donc maximal juste après l'application. Il est ensuite difficile de prévoir l'évolution des transferts des molécules, le stock présent dans le sol étant très dépendant des conditions pédoclimatiques.

- **Les mécanismes de transfert.**

Cinq mécanismes principaux de transfert vers les eaux peuvent être identifiés :

- la **dérive** lors de la pulvérisation,
- la **volatilisation**, dont l'intensité est variable en fonction des propriétés physico-chimiques des molécules et des conditions climatiques au moment et dans les jours suivant l'application,
- le **drainage artificiel** par des drains enterrés qui sont alimentés par les nappes superficielles se formant pendant les épisodes pluvieux, ou par de l'eau s'infiltrant par les tranchées de drainage,
- les **transferts latéraux de nappe**, à proximité de la surface de la nappe,
- le **ruissellement** de surface (figure 2).

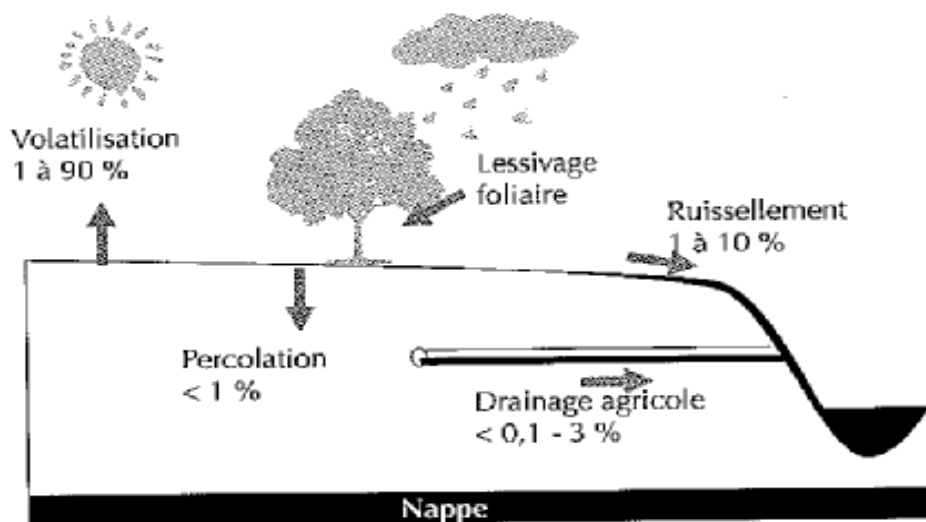


Figure 2 : Principaux mécanismes de transfert des produits phytosanitaires appliqués. Extrait expertise pesticide de Voltz et al, 2001. On notera que le transfert vers les eaux arrive loin derrière le transfert vers l'atmosphère par volatilisation.

Une faible fraction des molécules (moins de 1% du total en général) peuvent être retrouvés dans les nappes du fait de voies de circulation préférentielle ou de cheminements directs entre la surface du sol et la nappe. Les taux d'exportation restent faibles, de quelques pourcents et concernent surtout les bas de versant où la nappe est peu profonde. Les plus forts taux d'exportation sont observés pour les ruissellements de surface où la concentration de l'eau peut atteindre 1 mg/l (la norme de potabilité est fixée à 0,1 µg/l).

- **L'évolution des produits phytosanitaires pendant le transfert.**

Les produits phytosanitaires une fois au sol se dégradent par plusieurs mécanismes : transformation par les micro-organismes qui en utilisent les composés carbonés (ou

biodégradation), photolyse, précipitation, ... Ces transformations fragmentent les molécules initiales, donnant des *métabolites* ou produits de dégradation. Leur toxicité et leur comportement dans le sol sont différents de celui de la molécule mère.

3- Le stock de produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires ne s'accumulent généralement pas dans les sols sur le long terme puisque les demi vie des produits excèdent rarement une centaine de jours et sont très souvent inférieures. Le stock de produits phytosanitaires est donc faible en comparaison des applications annuelles. Ils restent mal connus car les métabolites sont rarement mesurés dans les sols.

II. Nitrates

1- Nature chimique

Les nitrates sont très solubles dans l'eau. Chargés négativement, ils ne sont pas retenus par le complexe argilo-humique du sol. Ils sont donc véhiculés à 100 % sous forme dissoute.

2- Le transfert des nitrates

Les nitrates n'étant pas retenus par le sol, ils migrent verticalement vers la profondeur (lixiviation) et contaminent la nappe qui les stocke. L'essentiel du transfert des nitrates vers la rivière se fait par écoulement de nappe. La proportion de nitrates véhiculée par le ruissellement (qui représente moins de 5 % du débit de la rivière à l'échelle de l'année) est comparativement très faible.

Des abattements par rapport aux apports existent cependant du fait de :

- l'absorption par les végétaux,
- l'incorporation dans la matière organique par les micro-organismes du sol,
- la dénitrification qui les transforme -si les réactions sont complètes- en azote gazeux N_2 . Cette suite de réactions ne se produit que dans certaines conditions particulières (absence d'oxygène, présence de carbone assimilable, présence de sulfures...)

Le stock de nitrate dépend donc des apports et des transformations qui affecte ses apports. Le nitrate est un composé qui peut s'épuiser par exportation et/ou transformation. Si les apports sont supérieurs aux exportations et aux transformations, il peut cependant y avoir constitution de stocks.

3- Sources et stock de nitrates

Contrairement aux produits phytosanitaires, les nitrates sont présents naturellement dans la pluie et le sol, notamment du fait de la minéralisation de la matière organique et de la nitrification de l'ammonium (figure 3) : les nitrates sont une des formes de l'azote présent dans les sols. En présence d'oxygène, les nitrates sont la forme minérale la plus stable dans le sol. Ils évoluent vers d'autres espèces chimiques lorsque les conditions du milieu varient (absence d'oxygène notamment).

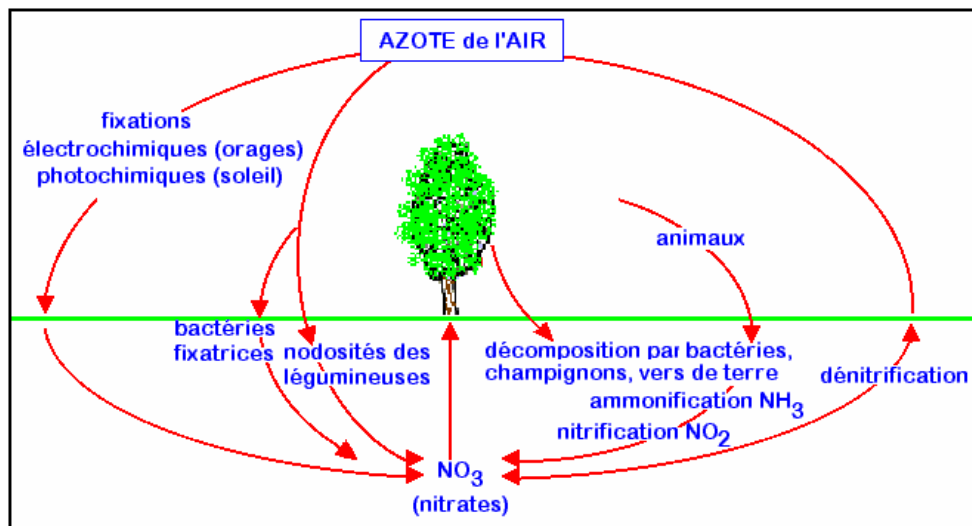


Figure 3 : Le cycle de l'azote. Extrait de Aguesses, 1971.

Cependant, dans le cas de sols agricoles, les engrais et les déjections apportées aux cultures sont une source d'azote supplémentaire. Cette source supplémentaire peut induire des flux de composés azotés bien supérieurs aux flux liés au sol.

L'azote des engrais minéraux se présente sous forme de nitrate ou d'ammonium, deux formes très facilement assimilables par les plantes. Dans des conditions de pratiques normales, l'azote des engrais minéraux est assimilé dans l'année par la culture en place. Une application mal maîtrisée peut cependant conduire à des excédents de nitrate dans le sol, lesquels peuvent migrer vers les nappes ou les eaux de surface entraînant leur pollution.

L'azote des déjections animales est incorporé dans des molécules organiques. Il n'est pas directement assimilable par les plantes. La libération du nitrate se fait par minéralisation progressive de la matière organique, ce qui peut engendrer des arrières effets perceptibles les années suivant les épandages, du fait du caractère lent du processus de minéralisation. Les déjections apportées sont de différentes natures (lisiers, fumiers, fientes sèches) et d'origines animales variées (bovins, porcs, volailles, ...). Comme dans le cas des engrais minéraux, des apports excessifs de déjections animales au sol peuvent conduire à des excédents de nitrates et à des pollutions des nappes et des eaux de surface.

Au final, le stock annuel de nitrates dans le sol est lié :

- à la minéralisation de la matière organique du sol qui libère des nitrates,
- aux excédents des apports par rapport aux exportations des cultures.

Ce stock est facilement entraîné par les pluies (lessivage). L'historique des pratiques agricoles sur la parcelle et le bassin versant permet ainsi d'évaluer le stock pluri-annuel de la nappe. Ce stock peut contribuer très significativement aux flux de nitrates dans la rivière, par comparaison aux apports annuels.

On peut ainsi distinguer deux types de bassins versants :

- les bassins versants dont les apports sont globalement consommés par la végétation. L'excédent en nitrate est nul ou faible. La nappe ne s'enrichit pas en nitrate.

- les bassins versants dont le bilan annuel de nitrate est excédentaire du fait d'apports répétés de quantités de nitrate supérieures au besoin des cultures. Ces bassins versants ont vu la teneur en nitrate de leur nappe augmenter du fait de l'entraînement en profondeur des nitrates excédentaires présents chaque année, celle-ci pouvant continuer d'augmenter encore aujourd'hui si les apports n'ont pas été maîtrisés. Ces cas sont les plus fréquents en Bretagne.

Plusieurs études ont été conduites pour quantifier les stocks d'azote en excès dans les bassins versants de ce deuxième type et les temps mis par cet azote pour être transférés vers les rivières sous forme de nitrates. Sans entrer dans le détail des méthodes et calculs, certaines conclusions peuvent être tirées de ces études :

- l'azote appliqué sur un bassin versant au cours d'une année n'est que faiblement restitué dans la rivière l'hiver suivant son application (comme on l'a longtemps cru). L'azote (des déjections, des engrais ou de la minéralisation de la matière organique) met plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années pour transiter dans la nappe puis vers la rivière du fait de sa réorganisation dans la matière organique mais aussi des temps de transferts très longs vers la nappe (voir chapitre 2).
- la quantité d'azote restituée à la rivière une année donnée est conditionnée par la pluviosité annuelle (stockage de l'azote en année sèche, libération en année humide) et à leur alternance dans le temps.
- du fait des temps de résidence de l'eau dans le sol et le sous sol importants, la mesure des concentrations à l'exutoire d'un bassin versant n'est pertinente pour évaluer l'évolution du paramètre nitrate dans les cours d'eau, que si elle s'inscrit sur le long terme.
- un indicateur complémentaire serait l'estimation des changements de pratiques agricoles (fertilisation raisonnée, apports fractionnés, mise en place d'aménagements), autant d'actions qui auront un impact durable mais non immédiat sur les concentrations et flux de nitrates⁵.

III. Matière organique dissoute

1- Nature de la matière organique

La matière organique est un terme générique qui regroupe un très grand nombre de molécules, issues pour la plupart du monde vivant et se trouvant dans un état de décomposition plus ou moins avancée. Les molécules constitutives du compartiment organique des sols et des eaux ne sont généralement pas distinguées les unes des autres. Leur abondance est décrite globalement par la concentration du sol ou de l'eau en "carbone oxydable" ou "carbone organique", qui est le constituant majeur des matières organiques. La matière organique est également décrite par son rapport carbone / azote ou C/N qui détermine son degré de décomposition, un faible rapport C/N indiquant un cycle court de la matière organique. Comme pour le phosphore, on distingue souvent la matière organique dissoute de la matière organique particulaire avec des réalités chimiques très

⁵ La concentration est une mesure instantanée. Multipliée par le débit de la rivière, elle donne un flux, c'est à dire une quantité de nitrate transmise à l'aval.

diverses au sein de ces deux groupes. Cette distinction permet cependant d'associer à ces deux groupes des modes de transfert différents.

2- Le transfert de la matière organique

La matière organique qu'elle soit dissoute ou particulaire est transférée au cours d'eau principalement pendant les épisodes de crue. Ceci s'explique par le fait que les matières organiques se complexant fortement avec la matrice argileuse du sol et étant contenues dans les premiers cinquante centimètres du sol, il faut qu'il y ait écoulement de l'eau dans ces premiers centimètres pour qu'il y ait transfert, situation qui ne se réalise que pendant les crues. Les concentrations maximales en matières organiques sont donc pendant les crues. La persistance des nappes dans les horizons organiques du sol pendant la période hivernale peut également conduire à des transferts, mais limités dans ce cas à des matières organiques dissoutes. En terme de bilan, les transferts de matière organique dissoute représente souvent 70% du total transféré aux rivières. Quoi qu'il en soit, ce sont les matières organiques dissoutes qui posent problème lors du traitement et ce sont donc elles dont il convient de limiter le transfert. Il n'y a pas de transfert de matière organique vers les nappes, dont les concentrations en matières organiques restent toujours très faibles.

3- Le stock de matière organique

Le stock de matière organique est localisé dans les cinquante premiers centimètres du sol où la teneur est en moyenne de 4 % même si de très fortes variations existent en Bretagne.

Ce stock est constitué pour une grande part de l'accumulation dans le sol des résidus végétaux. L'âge de la matière organique accumulée peut être très ancien, dépassant la centaine d'année. Ce stock bénéficie aussi des apports de déjections animales au sol qui contribuent à en maintenir la taille. Une très faible partie (moins de 1/1000^{ème} du stock) de cette matière organique est mobilisée chaque année sous forme dissoute et exportée vers les rivières. Des études réalisées en Bretagne et ailleurs dans le monde montrent que la matière organique exportée des sols sous forme dissoute a un âge supérieur à 100 ans, excluant tout rôle direct des apports de déjection animale au sol. Comme pour les produits phytosanitaires, des changements brutaux dans les conditions hydrologiques ou physico-chimiques régnant à l'interface eau-sol peuvent entraîner de fortes pollutions.

IV. Métaux lourds

1- Nature chimique

Les éléments traces métalliques sont présents dans le sol sous des formes chimiques très variées dépendant de la composition du sol et des conditions du milieu. La part présente en solution dans le sol (sous forme ionique) ne représente qu'une faible proportion de la quantité totale, les métaux lourds étant surtout associés à la matrice organo-minérale solide du sol.

2- Le transfert des métaux lourds

L'association des métaux lourds à la phase solide du sol fait que ceux-ci sont en règle générale très peu entraînés vers les nappes. Ils sont aussi faiblement entraînés vers les eaux de rivières, sauf en période de crue lorsque que la charge en matière en suspension issue de l'érosion des sols s'accroît. Toutefois des processus de remobilisation sont possibles notamment lors de changements des conditions oxydo-réductrices du milieu qui peuvent accroître la proportion de métaux sous forme d'ions libres, accroissant par la même leur mobilité.

Les transferts de métaux lourds ont été peu étudiés et peu de chiffres sont disponibles, la difficulté résidant notamment dans les différentes formes que prennent ces éléments traces, rendant complexe le suivi de leur évolution dans les sols et dans l'eau. Deux mécanismes principaux peuvent être mentionnés :

- le transfert par érosion ou ruissellement pour les éléments métalliques associés aux particules solides.
- le transfert vers l'eau suite à des modifications des conditions du milieu (oxydo-réduction).

3- Le stock de métaux lourds

Aujourd'hui, les apports annuels de cuivre et de zinc – les deux principaux métaux lourds apportés aux sols par l'agriculture, notamment par l'alimentation des animaux - sur l'ensemble des sols bretons sont de 400 tonnes de cuivre métal et de 700 tonnes de zinc métal par an. Les stocks seraient de 15 000 tonnes de cuivre métal et entre 15 000 et 20 000 tonnes de zinc métal pour l'ensemble de la Bretagne (Conseil scientifique régional de l'environnement, 2003). Bien que peu d'attention soit encore portée à ce problème, il est évident que cette augmentation devra rapidement trouver ses limites dans le cadre d'un développement durable des activités d'élevage.

V. Phosphore

1- Nature chimique

On distingue en général deux formes de phosphore dans l'eau :

- le phosphore dit dissous (qui passe par un filtre de 0,45 μm),
- le phosphore particulaire (tout le reste),

L'ensemble constituant le phosphore total.

La fraction dissoute du phosphore comprend les ions orthophosphates des molécules organiques et le phosphore lié aux petites molécules organiques. La fraction particulaire regroupe le phosphore combiné aux oxydes de fer et aux argiles, le phosphore associé aux débris organiques grossier et le phosphore constitutif des minéraux phosphatés. La distinction phosphore soluble / phosphore particulaire ne recouvrant pas une réalité chimique homogène, il est souvent difficile de comparer les résultats issus d'études différentes sur ces seules bases.

2- Le transfert du phosphore

Le phosphore est majoritairement transféré du sol aux eaux sous forme particulaire (souvent 50 à 90 % du phosphore total véhiculé). Le phosphore émis par des territoires agricoles est de ce fait principalement transféré dans les cours d'eau lors des épisodes de crue, périodes pendant lesquelles le ruissellement mobilise et entraîne les particules solides du sol. Les concentrations pendant les crues peuvent atteindre entre 15 à 50 fois

celles mesurées hors crue. Cependant, ces valeurs sont très variables selon les bassins versants. Bien que moins important, le phosphore dissous mérite une grande attention, car il constitue une forme biodisponible du phosphore, c'est-à-dire une forme directement assimilable par les organismes vivants, donc très directement impliquée dans l'eutrophisation des eaux.

3- Le stock de phosphore

Le stock régional de phosphore total dans les sols de Bretagne est estimé avec une assez grande incertitude du fait de la méthode de calcul indirecte utilisée. Il est estimé entre 8 et 12 millions de tonnes (exprimé en P). L'imprécision vient du fait des incertitudes pesant sur les apports et les exportations. A titre d'exemple, les apports annuels de phosphore agricole sur les sols ont été estimés à 86 000 tonnes de P pour la Bretagne en 2000 (< 1/100 du stock).

L'excédent du bilan est estimé à environ 30 000 tonnes par an en prenant en compte les besoins des cultures (environ 56 000 tonnes de P par an) et le phosphore domestique apporté sur les sols (boues de station). Ce phosphore excédentaire contribue à l'augmentation du stock de phosphore dans les sols (Conseil scientifique régional de l'environnement, 2003).

VI. Conclusion : Les polluants les plus étudiés, nitrates et produits phytosanitaires

En résumé, les éléments polluants se décomposent en deux grandes familles (les fortement mobiles parce que fortement solubles et les faiblement mobiles parce que le plus souvent liés à la phase solide du sol), suivant leur devenir dans l'environnement (accumulation ou transformation), ce qui détermine leur comportement et leur potentialité de transfert vers les cours d'eau.

Nitrates et produits phytosanitaires sont les polluants les plus étudiés. Ils sont souvent considérés comme les « chefs de file » de ces deux familles. **Les nitrates** sont très solubles, persistants car la plupart des nitrates en surplus restent dans le bassin versant et vont très progressivement vers les eaux. Ils suivent donc le même type de chemin que l'eau qui percole : on dit qu'ils transitent par lixiviation et par écoulement latéral de nappe. Les nitrates sont également un exemple type de polluants persistants, même si des mécanismes naturels de transformation existent (dénitrification), ceux-ci étant néanmoins trop limités dans le temps et dans l'espace pour "traiter" tous les excédents. **Les produits phytosanitaires** ont quant à eux une grande affinité pour la phase solide du sol. Ils se lient avec elle et sont transportés principalement adsorbés aux particules. Sauf conditions particulières, les pesticides sont transportés aux rivières essentiellement par ruissellement lors des événements pluvieux. Ils ne suivent donc la plupart du temps que la composante latérale et de surface de l'eau, n'étant que peu ou pas transférés vers les nappes. Les pesticides sont également un exemple de polluants relativement peu persistants dans l'environnement, la plupart étant rapidement dégradés par les microorganismes des eaux et des sols.

Au final, ce sont donc les conditions et les mécanismes régissant le transfert de l'eau qui régulent les transferts de nitrate et de produits phytosanitaires dans les bassins versants, même si les mécanismes et les voies de transferts sont différents d'un bassin versant à l'autre.

Ce qu'il faut retenir : Les pollutions de l'eau

- ☒ La qualité de l'eau est évaluée par des aspects **physico-chimique et écologique**. Des textes réglementaires fixent les teneurs maximales à respecter pour les eaux brutes.

| <i>Paramètre</i> | <i>Valeur réglementaire</i> | <i>Valeur guide</i> |
|-----------------------------------|---|---|
| ▪ Nitrates NO₃ | 50 mg/l | 25 mg/l |
| ▪ Produits phytosanitaires | 0,1 µg/l par substance 0,5 µg/l du total des substances mesurées | - |
| ▪ Phosphore | 5 mg/l de P ₂ O ₅ | 0,4 mg/l de P ₂ O ₅ |

- ☒ Des impacts écologiques existent bien en deçà de ces seuils pour chacun de ces éléments chimiques. Des valeurs seuils sont à déterminer, car elles dépendent des interactions entre pollutions, des conditions de milieux et des dynamiques temporelles.
- ☒ Deux types de substances polluantes sont distinguées : les **substances utilisées en agriculture** pour amender le sol (nitrates, phosphore,..), dans l'alimentation animale (métaux lourds, ...) ou pour protéger les cultures (produits phytosanitaires), et les **substances naturellement présentes** dans les sols (matières organiques).
- ☒ Selon les polluants, deux stocks sont à considérer : le **stock du sol** par accumulation des polluants persistants (phosphore et métaux lourds) et le **stock de la nappe** par migration des polluants solubles et persistants en profondeur avec les eaux de pluie (nitrates).
- ☒ Les **polluants les plus étudiés** sont les nitrates et les produits phytosanitaires, leurs caractéristiques agissent sur la nature de la pollution de la ressource eau et de sa mitigation.

| NITRATES | PESTICIDES |
|---|--|
| • nature | |
| - anion monovalent très soluble | - molécules organiques variées, par leur solubilité et leur capacité d'adsorption au sol (Koc) |
| • source | |
| - <u>apports annuels</u> multiples : engrais, déjections animales, minéralisation naturelle de la matière organique du sol ... | - <u>apports annuels</u> : produits de synthèse pour le traitement des cultures |
| - <u>stock pluriannuel</u> important dans les nappes, dans les sols lié à la MO, lié aux pratiques agricoles, | - <u>stock pluriannuel</u> souvent de l'ordre de quelques jours à quelques mois ; localisé principalement dans les horizons superficiels des sols. |
| • temps de résidence | |
| Fort : - la matière organique du sol est une source importante - stock dans les nappes liés aux excédents de nombreuses années | Réduit : - liée à la dégradation dans les sols (produits de dégradation souvent mal connus) - très variable selon les produits, les sols, les conditions hydriques et de température (demi-vie) |
| • mobilité | |
| Forte : - élément très soluble | Moyenne et variable selon les produits : - rétention sur les sols (Koc) - solubilité variable |
| • direction de transfert | |
| - vertical, vers la nappe - puis latéral à différentes profondeurs | - latéral, de surface et de subsurface |
| • voie de transfert | |
| - lessivage et transfert de nappe | - ruissellement et frange superficielle de la nappe |
| • temps de transfert | |
| longs : années | courts : jour, mois |

Chapitre 2 :

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

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

I- Généralités : les circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

II- Infiltration et percolation de l'eau

III- Ruissellement et érosion

- 1- Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration
- 2- Le ruissellement sur sols saturés
- 3- Ruissellement, érosion hydrique et sédimentation
- 4- L'exfiltration

IV- Ecoulement de nappe

- 1- Toit de la nappe et position topographique, écoulement de subsurface
- 2- Réactivité de la nappe aux pluies : l'influence de la porosité du milieu
- 3- Estimer la vitesse des écoulements dans la nappe
- 4- *Stratification chimique de la nappe*

V- Vitesse de transfert

- 1- Ecoulement par ruissellement
- 2- Ecoulement dans la zone non saturée
- 3- Ecoulement dans la zone saturée (nappe)

VI- Temps de transfert

- 1- Le haut de versant ou les zones de plateau
- 2- La partie en pente du versant
- 3- Le fond de vallée

VII- Conclusion : une réalité plus complexe, des milieux très hétérogènes et une forte influence des conditions locales sur les transferts

Ce qu'il faut retenir.

I. Généralités : les circulations de l'eau et des polluants dans les bassins versants sur socle

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 4).

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 biogéochimiques⁶ 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 variables.

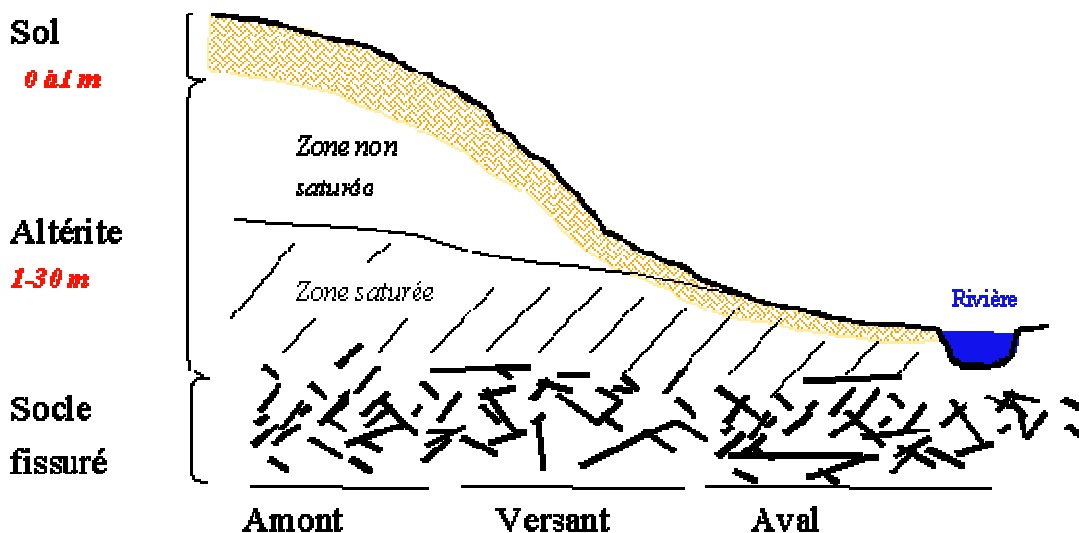


Figure 4 : schéma de la répartition des différentes couches constituant le contexte hydrologique d'un bassin versant sur socle en Bretagne.

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'infiltré, 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.

⁶ Activités microbiennes, absorption et restitution par les végétaux ...

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**.

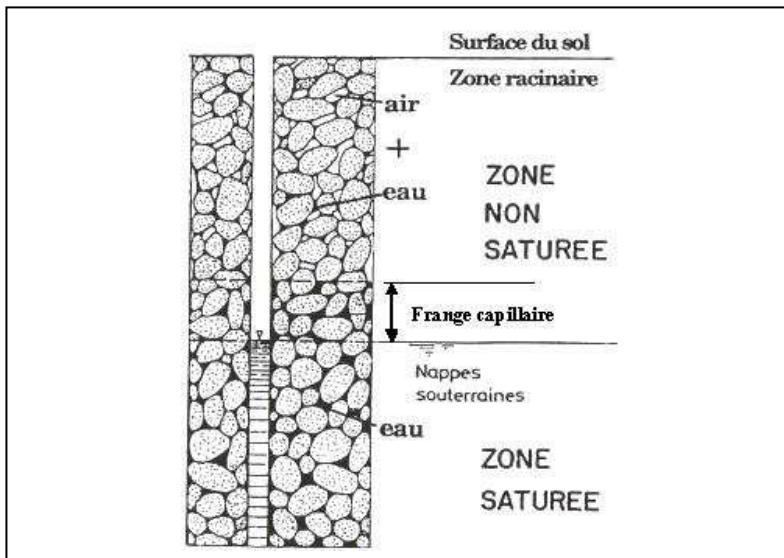


Figure 2 : Distinction entre la zone non saturée et la zone saturée.

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

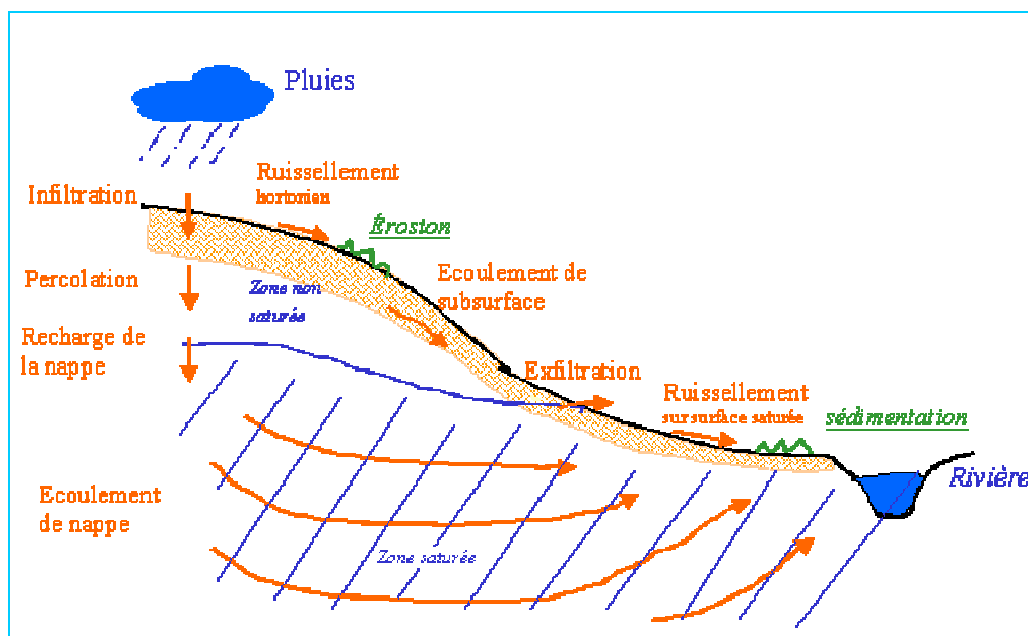


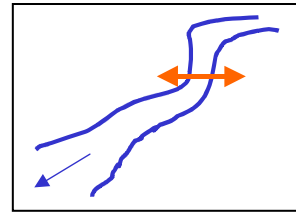
Figure 3 : Les circulations de l'eau et des particules lors d'un épisode pluvieux le long d'un versant. L'évapotranspiration n'est pas représentée.

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.

Répartition de l'origine des volumes d'eau arrivant à la rivière :

- Pendant les périodes de crue :

| | |
|-------------------------|------------------|
| 10-30% ruissellement | 70-90 % nappe |
|-------------------------|------------------|



- Hors périodes de crue :

| |
|-------------|
| 100 % nappe |
|-------------|

- En une année complète :

| | | |
|------------------------|------------------|--------------|
| 5-10% ruissellement | 90-95 % nappe | Volume total |
|------------------------|------------------|--------------|

Figure 4: Répartition des volumes transitant sur une section de rivière selon les évènements 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).

II. Infiltration et percolation de l'eau

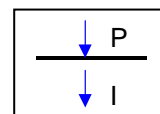
L'infiltration est le passage de l'eau de la surface du sol à l'intérieur de celui-ci. Lorsque le sol est suffisamment humide, mais pas encore saturé, une fraction de l'eau percole et descend verticalement vers la nappe. La percolation dépend donc du volume d'eau précipité et de l'humidité du sol. Elle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

si $P < IC$, pas de ruissellement (R), toute la pluie s'infiltrate :



si $P > IC$, ruissellement avec $R = IC - P$:

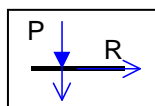


Figure 5 : Répartition de la pluie entre infiltration et ruissellement

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'infiltré pas est appelée ruissellement.

III. Ruissellement et érosion

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.

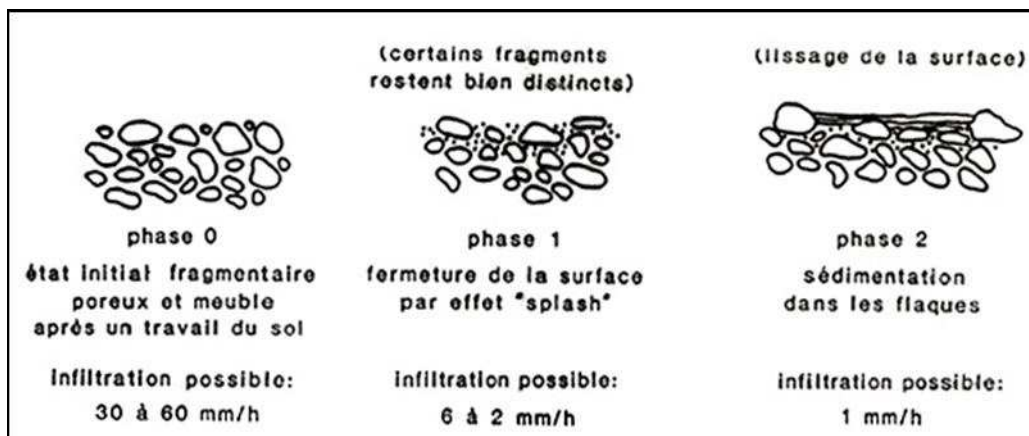


Figure 6 : Développement d'une croûte de battance à la surface du sol sous l'effet de la pluie. Extrait de Cosandey, 1990, D'après les travaux de J. Boiffin.

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.

Quelques chiffres en Bretagne

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 Armoricaïn, 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 départs 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'évènements 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.

IV. Écoulement de nappe

Les écoulements dans la nappe sont alimentés par les eaux de percolation (figure 5). 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 être toujours reliés au même événement pluvieux que l'écoulement de surface : ils proviennent généralement des pluies antécédentes. 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'altérite (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).

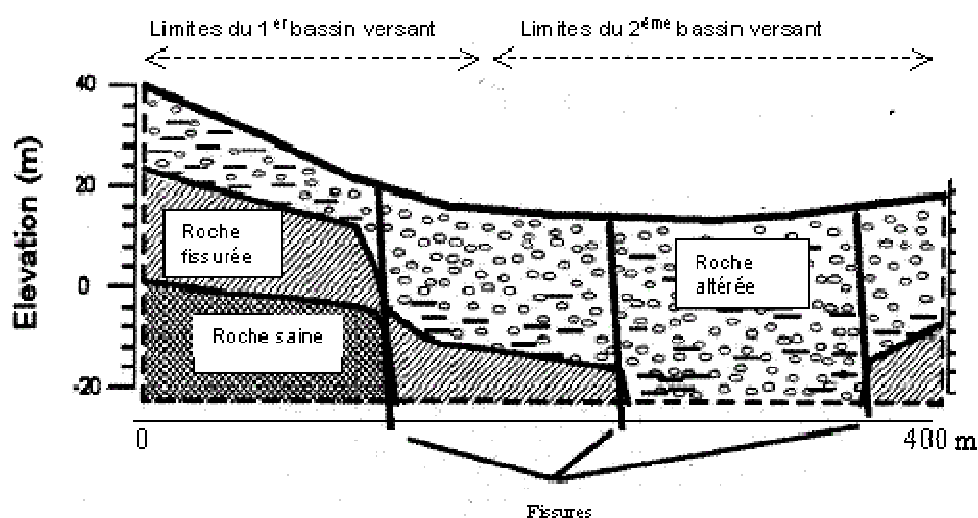


Figure 7 : Interprétation de l'épaisseur de l'altérite sur deux petits bassins versants granitiques finistériens (D'après Legchenko et al., 2003, extrait de Martin, 2003, interprétation par Résonance Magnétique Protonique et résistivité électrique).

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 gradient 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.

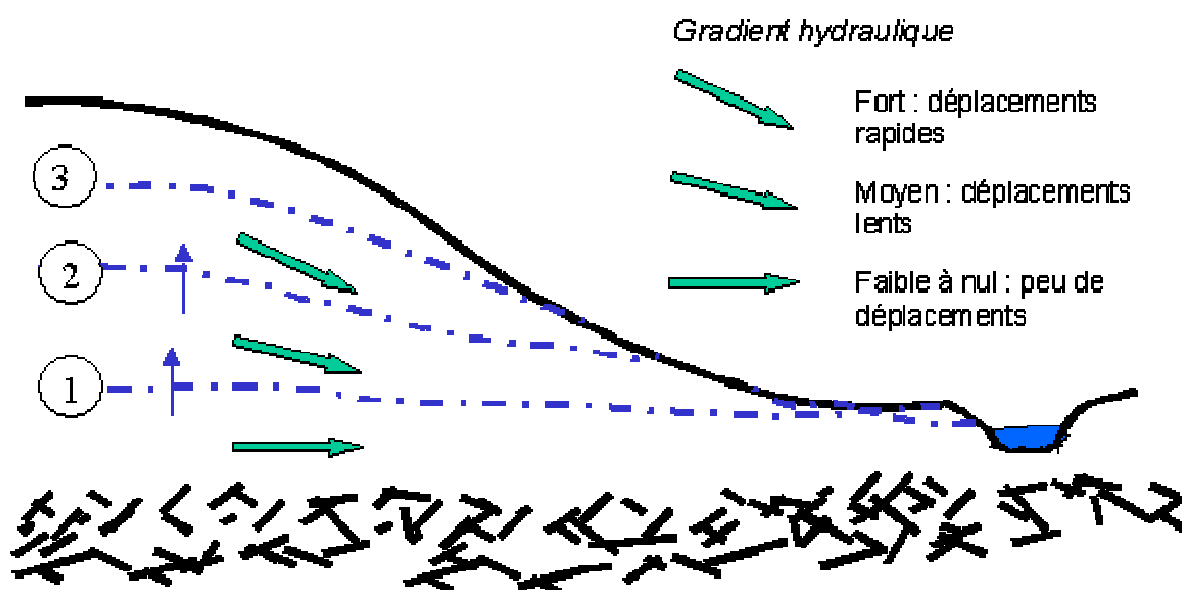


Figure 8 : Variations des hauteurs de la nappe au cours de l'année du fait de sa forte réactivité aux pluies et, en conséquence, des gradients hydrauliques à mi versant (flèches pleines vertes).

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'altérite. 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'historique agricole du bassin versant mais aussi des possibilités d'épuration qui peuvent s'y produire (dénitrification autotrophe par la pyrite (voir chapitre x).

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.

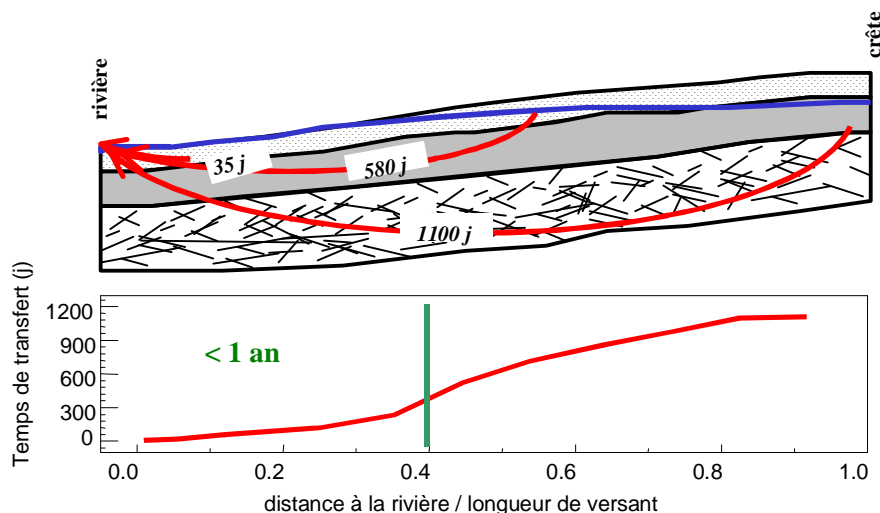


Figure 9: Temps de transfert de l'eau estimés par modélisation sur un versant du bassin versant de Kervidy-Naizin (56), (Molénat et Gascuel-Oudoux, 2002) : sur les 40% de la longueur du versant, l'eau arrive à la rivière dans l'année, sur le reste elle met plus d'un an, ceci en ne considérant que le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

VI. 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

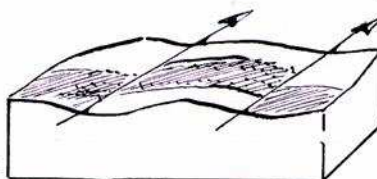
C'est la partie la plus basse topographiquement où la nappe est proche de la surface toute l'année (0-2 m). C'est la forme du fond de vallée, plus ou moins encaissée, qui favorise ou non l'extension de la zone saturée en surface. Dans ce cas, les déplacements latéraux sont très importants et les temps 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.

Les 4 contextes du bassin versant de St Léger (35)

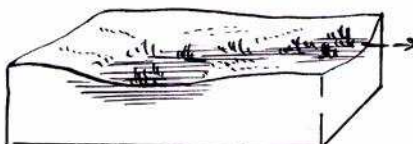
Plateau

Chemins de l'eau anthropiques
érosion faible, secteur de départ



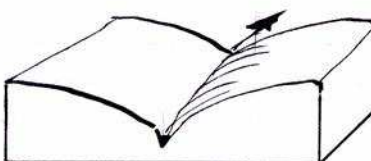
Noue

érosion faible



"Pente"

versant
de vallon en V
érosion active



Fond

alluvial
érosion: secteur de dépôt



Thomas Schmutz, Aubépine - Vern (35) - 2004

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

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 donc 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

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.