



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR- DJELFA
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES ET VÉTÉRINAIRES

COURS

Qualité des eaux souterraines et superficielles

DESTINÉ AUX ÉTUDIANTS DE :

1^{ÈRE} ANNÉE MASTER, EAU ET ENVIRONNEMENT

Présenté par : Dr. BOUTELDJAOUI Fatah, MCB, Université Ziane Achour-
Djelfa

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022/2023

Chapitre II : Transfert des polluants vers les eaux souterraines

II.1 Introduction

La pollution de l'eau est une **altération des qualités naturelles (physiques et chimiques)** d'une eau. C'est à la fois l'action et les **processus de dégradation** des qualités de l'eau. La **pollution des eaux souterraines** entraîne le **risque permanent de limitation** de cette ressource dans un proche avenir. Elle résulte essentiellement de **l'activité humaine** indépendamment de la **détérioration naturelle** liée aux **facteurs géologiques**.

II.2 Transferts des polluants vers les eaux souterraines :

Le transport des polluants et leur évolution dans le **sol** et le **sous-sol**, sont déterminés par les trois comportements de l'aquifère : **hydrodynamique**, **hydrochimique** et **hydrobiologique**. Leur connaissance est essentielle pour la compréhension de la **propagation et l'évolution des polluants**, de la **surface du sol** aux lieux d'utilisation.

Les **modalités** et le **temps de transfert** des polluants varient selon les **types de polluants** et selon le **milieu traversé**. En effet, le déplacement de l'eau dans les sols est bien plus complexe que dans les nappes souterraines. Ceci parce que le milieu est **variablement saturé** au cours du temps et qu'il est **très hétérogène** dans l'espace.

II.2.1 Transfert dans le sol

Le **sol** représente la partie supérieure de la **zone non saturée** et il est caractérisé par une **activité biologique** significative. Il constitue un puissant moyen **d'épuration des eaux**. La **composition chimique** et **l'activité biologique du sol** peuvent retenir et transformer des quantités élevées de **polluants**. Ce sont les constituants du sol **en argiles** et en **matières organiques** qui fixent les polluants et définissent les conditions **d'écoulement** dans **les sols** ainsi la capacité des aquifères à retenir les polluants sont liées à ses composants. La richesse relative en **minéraux argileux** et en **matière organique** joue un rôle sur l'aptitude du sol à **retenir**, à **fixer** ou **dégrader** des polluants apportés par **infiltration**.

II.2.2 Transfert dans la zone non saturée

La **zone non saturée** joue un rôle dans la **filtration** et la **rétenion de certaines substances**. Cette action est d'autant plus efficace que la **granulométrie** est **plus fine**. Elle est caractérisée par la grande complexité des **processus physico-chimiques** agissant sur le polluant en particulier dans la **zone racinaire (les 30 à 40 premiers centimètres du sol)** ou se déroule une part importante des

processus chimiques et biochimiques. C'est le long de cette zone, qui contient de l'eau et de l'air, que les **processus de sorption, de dispersion, de filtration, de biodégradation et d'oxydo-réduction** ont lieu. Si cette zone est composée de **roches peu perméables**, elle crée une couche de **confinement** pour les aquifères sous-jacets et **réduit considérablement leur vulnérabilité.** L'épaisseur de la zone non saturée (**ZNS**) conditionne le **temps de transfert** d'un **polluant** jusqu'à la nappe à cause des **phénomènes de rétention et d'interactions physico-chimiques** avec l'encaissant.

II.2.3 Transfert dans la zone saturée

Dans la **zone saturée**, le **rôle épurateur** est réduit, comparativement à la **zone non saturée.** La rareté ou l'absence d'**oxygène**, de **matières organiques** et de **microorganismes**, rend les mécanismes de transport du **soluté** dans l'aquifère très **complexes.** Dans la nappe, la **vitesse de propagation** du **soluté** dépend du **type de polluant**, et de sa **concentration (phénomène de diffusion).**

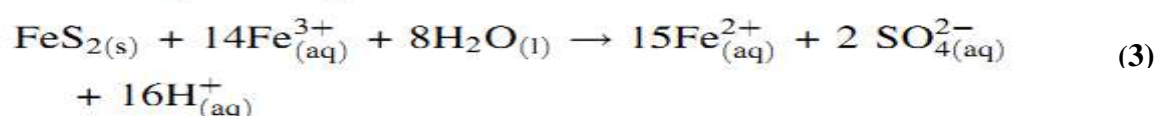
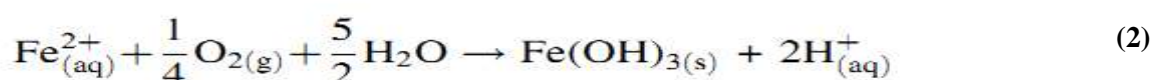
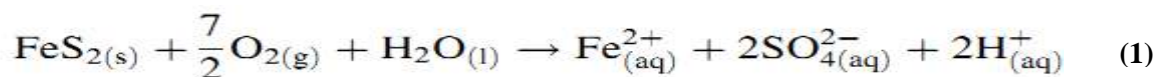
II.3 Les mécanismes régissant le transfert des polluants

II.3.1 Les processus géochimiques

➤ *Dissolution-Précipitation :*

Le long du trajet d'**écoulement des eaux souterraines (figure 3 et 4)** les **matières dissoutes** peuvent être **précipitées** lorsque l'**évaporation** et la **transpiration** augmentent leurs **concentrations** au-delà des limites de **saturation (climat aride).** La capacité de l'eau pour **dissoudre** les substances est augmentée par des **acides inorganiques et organiques** ainsi que par l'**augmentation** de la **température.**

➤ **Oxydo-réduction :** une réaction **redox** ou **d'oxydo-réduction** est le transfert d'électrons entre un **donneur (le réducteur)** et un **accepteur (l'oxygène).** Un **oxydant** est d'autant **plus fort** qu'il fixe plus facilement les électrons.



Adsorption/désorption : L'**adsorption** est la propriété qu'ont certains **corps solides** de retenir les **molécules** d'autres corps (à l'état **gazeux ou liquide**) à leur **surface**. On distingue **deux mécanismes d'adsorption** : l'**adsorption physique** qui est due à des **forces électrostatiques** (**forces de van der Waals**) et l'**adsorption chimique** ou **chimisorption** qui met en jeu des **liaisons chimiques** entre le **solide adsorbant** et le **fluide adsorbé** avec **activation de ses molécules**. L'**adsorption physique** peut être **réversible** (**phénomène de désorption**) et présente le risque de libérer une partie de **substances piégées**. Il en résulte un **retard de migration** des **polluants dissous** dans l'eau de la **nappe**. L'**adsorption chimique** met en jeu des **liaisons** beaucoup **plus énergétiques** qui peuvent rendre le **phénomène irréversible** (**résidus liés**). Dans ce cas, il en résulte une **baisse de la concentration de contaminant** dissous dans l'eau de la nappe.

Dans le milieu naturel, les deux types d'adsorption coexistent en fonction de la composition du milieu. Les milieux riches en **matière organique** et/ou en **minéraux fins** (**granulométrie < 2µm**) sont les plus favorables aux **mécanismes de sorption**.

➤ **II.3.2 Processus biologiques**

➤ **Biodégradation**

La **biodégradation** est l'ensemble des **mécanismes de transformation** d'un contaminant en différents **sous-produits**, par l'action des **microorganismes**. Ce processus est destructif, conduisant à l'**atténuation naturelle** à condition que les produits néoformés (**métabolites**) aient une **toxicité moindre**. Il en résulte généralement une diminution de la **concentration de polluant initial**. En revanche, selon les cas, les **métabolites** peuvent aboutir à un ralentissement ou à une **accélération** de la **vitesse de propagation** et un **étalement** ou à un **resserrement** du front de **migration**.

L'ensemble des mécanismes de transformation d'un contaminant en différents sous-produits, par l'action des **microorganismes** se produit en **conditions d'aérobie** (en présence d'oxygène (**ou d'anaérobie** (**en absence d'oxygène**)) selon la **structure moléculaire** et les **conditions environnementales**.

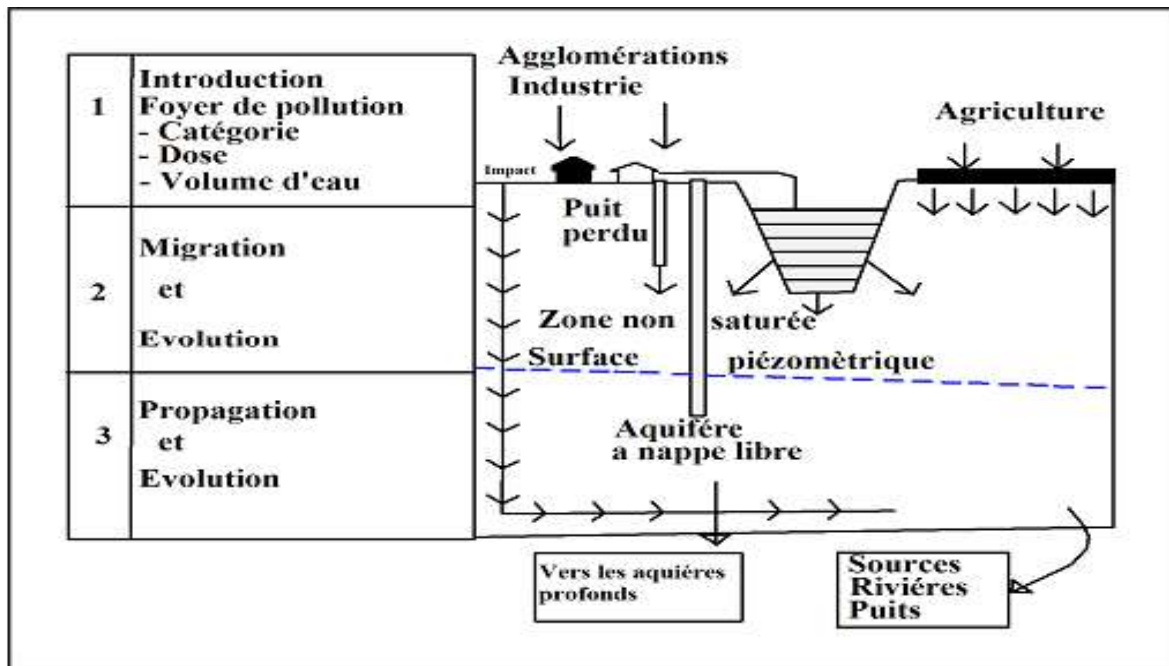


Figure 3. Origine transport et evolution du polluant

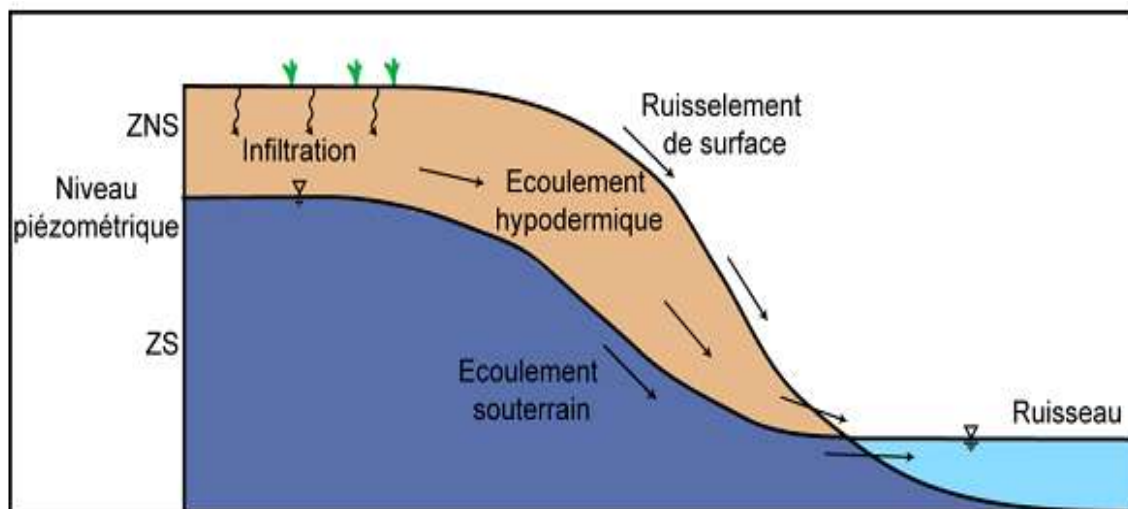


Figure 4. Écoulement souterrain (Zone Non Saturée (ZNS), Zone Saturée (ZS))

II.4 Transferts des nitrates dans l'eau souterraine (du sol à l'aquifère)

II.4.1 Le cycle de l'azote

Le cycle de l'azote (**figure 6**) débute par une **transformation biologique** de l'**azote atmosphérique** en une forme **azotée** assimilable par les **plantes**, l'**azote ammoniacal** (**ammoniac NH_3** et **ammonium NH_4^+**). Cette étape, appelée **fixation**, est assurée par des **bactéries** présentes dans le **sol** :

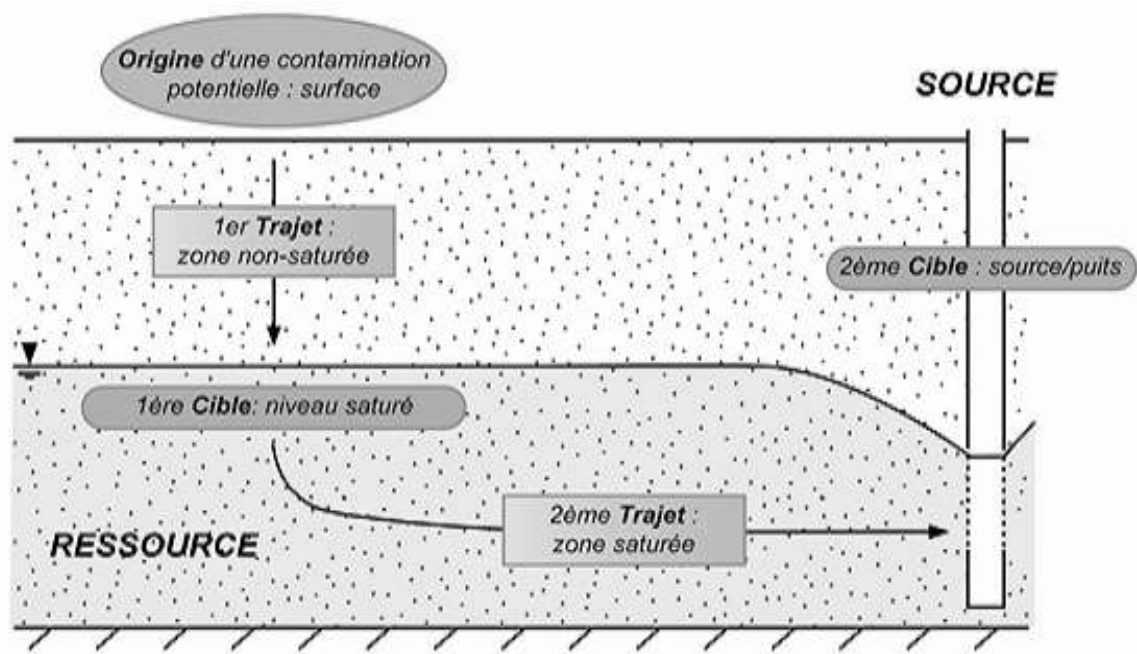
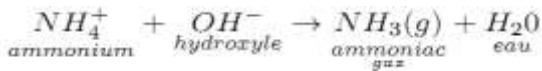
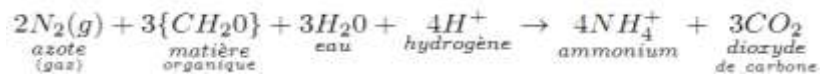


Figure 5. Schéma conceptuel de transfert des polluants vers les eaux souterraines

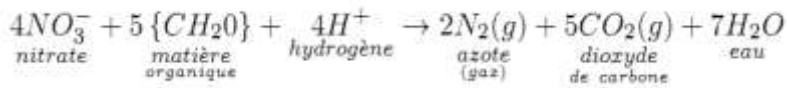
Des ions ammonium NH_4^+ peuvent aussi être produits via la **décomposition d'organismes morts** par des **bactéries saprophytes**.

Dans des **soils oxygénés**, des bactéries **nitrifiantes** assurent le processus de **nitrification** qui consiste à transformer les produits de la **fixation** (NH_4^+ et NH_3) en **nitrite (nitritation)** puis en **nitrate (nitratation)**, assimilables par les plantes :



Lorsque les **concentrations en oxygène dissous** ou **présent et biodisponible** dans le milieu diminue trop, le milieu est dit **anoxique**. Dans ces conditions, des **bactéries dénitrifiantes** transforment les **nitrate** en **diazote** au cours du **processus de dénitrification**. Deux types de dénitrification peuvent alors prendre place dans les aquifères :

La dénitrification hétérotrophe : elle se produit lorsque de la **matière organique** est **oxydée** par des **bactéries**. Lorsque les teneurs en **oxygène** sont **suffisamment faibles** dans le milieu, ces bactéries utilisent les **nitrate**s comme **accepteurs finaux d'électrons**, selon la réaction suivante :



La dénitrification autotrophe : en milieu **anaérobie**, des bactéries sont capables de respiration-nitrate à partir de diverses formes minérales. Ainsi, la bactérie **Thiobacillus denitrificans** est capable de respiration nitrates à partir de minéraux soufrés. Ces éléments **inorganiques soufrés** sont alors oxydés et les nitrates agissent comme **accepteurs d'électrons**. Nous écrivons comme exemple ci-dessous le processus de **dénitrification** par **oxydation de la pyrite** :

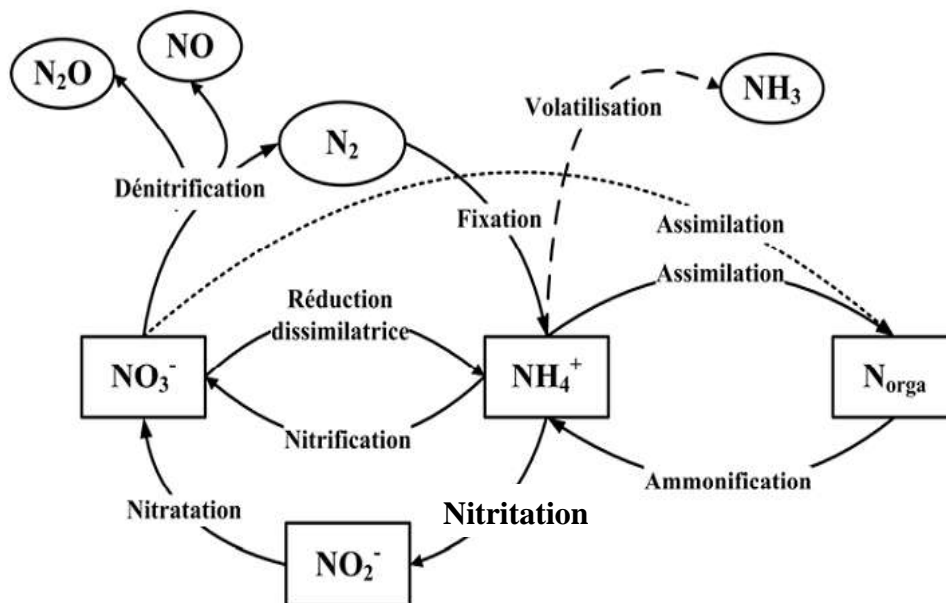
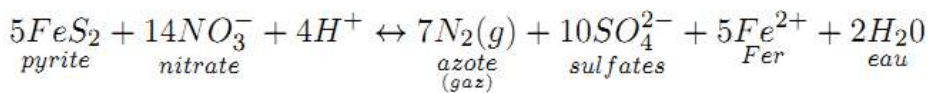


Figure 6. Cycle simplifié de l'azote. En **ovale** les **formes gazeuses**, dans les **carrés** les formes **dissoutes ou solide (N_{orga})**

II.4.2 Facteurs influençant la nitrification et la dénitrification

II.4.2.1 Facteurs influençant la nitrification

a) La température

La température de nitrification se situe entre **5** et **42°C** (**35° la température optimale**) (Gay, 1983), ce processus est plus intense en été car favorisé par des températures plus élevées et un apport accru en oxygène par **photosynthèse** (Schlesinger et Hartley, 1992; Cowan et Boynton, 1996).

b) Le pH

La nitrification est favorisée par des **pH neutres**, ou légèrement basiques. Elle devient faible dans les milieux acides (**tourbières, lacs**). Le pH idéal pour la **nitrification** est compris entre **6** et **8** (Josserand, 1983; Bock et al., 1989).

c) Teneur de l'oxygène dissous (O₂)

La **concentration optimale d'oxygène dissous** pour une **nitrification** se situe entre **0,5** et **4 mg/l** (Stenstrom et Poduska, 1980; Josserand, 1983). Selon Sharma et Ahler (1977), en présence de faibles concentrations d'oxygène l'affinité des **bactéries nitrifiantes** est déficiente comparée à celle des **bactéries hétérotrophes**, et pourtant les bactéries nitrifiantes sont peu efficaces (Prosser, 1989).

II.4.2.2 Facteurs influençant la dénitrification

a) La température

Aux **basses températures**, le taux de **dénitrification** diminue significativement mais est encore mesurable entre **0** et **5°C** (Knowles, 1982; Koba et al., 1997). La **dénitrification** est dépendante de la **température**, entre **5°C** et **45°C** les **micro-organismes** sont le plus efficaces pour réaliser ces processus. La température agit sur l'**activité** et le **nombre des bactéries dénitrifiantes** (Gordon et al., 1986). Donc la température optimale pour la dénitrification est entre **30** et **35°C** (Lalisse-Grundmann et al., 1983).

b) Le pH

D'après la réaction de dénitrification, ce processus consomme des **H⁺**. Ainsi au contraire de la **nitrification**, la **dénitrification** aurait tendance à **alcaliniser le milieu**. Mais cette réaction dégage aussi du **CO₂** augmentant l'influence du couple carbonate (avec une tendance à stabiliser le **pH** aux alentours de **6-6.5**). Knowles, (1982), montre que la dénitrification est limitée dans des conditions de **pH acide**.

c) Propriétés du sol (teneur en eau)

Dans le sol, le fonctionnement de la dénitrification dépend du niveau d'humidité qui conditionne l'aération et le niveau d'anoxie (Cadieu, 2004). La teneur en eau du sol facilite le développement de

bactéries anaérobies et favorise la diffusion des nitrates, c'est pourquoi la dénitrification croît avec la teneur en eau, et est optimale à la saturation du milieu.

II.4.3 Le transfert des nitrates dans le sol

La dynamique des transferts de solutés dans le sol ainsi que les facteurs influençant ces transferts ont été largement étudiés et sont plutôt bien connus.

Ces études ont permis de mettre en évidence l'influence de la **texture** et de la **composition minéralogique** d'un sol sur la **concentration en nitrates** des eaux du sol. Plus un sol est **argileux**, plus sa capacité de **rétenion de contaminants** sera a priori forte. Au contraire un **sol très sableux** laissera plus facilement passer les **polluants dissous**, facilitant leur **transfert dans l'hydrosystème**.

Tindall et al. (1995) ont mesuré les **lixiviations d'azote** par des **colonnes de 40 cm** d'épaisseur de **sols nus argileux** et **sableux** suite à des épandages de **fertilisants**. Les nitrates appliqués sur le **sol sableux** sont complètement transférés dans le système au bout de **10 jours**, alors que sur le **sol argileux**, **5 à 6 semaines** sont nécessaires pour que **60 %** des **nitrates** apportés soient **transférés par le sol**.

II.4.4 Les transferts de nitrates dans un hydrosystème

La **Figure 8** représente de manière simplifiée les transferts de nitrates dans un **hydrosystème** et y localise les processus de **dénitrification**.

Les **nitrates** sont la forme la plus **mobile** de **l'azote** dans le **sol**. Ils y sont donc stockés essentiellement dans la **phase aqueuse** sous forme **dissoute**. De fait, lorsqu'un **phénomène pluvieux** intervient, les **nitrates** circulent facilement dans le **sol** et sont aisément entraînés avec les **eaux ruisselées** et **infiltrées** :

Le ruissellement : lors de **fortes précipitations**, le sol peut se **saturer en surface** et/ou en **subsurface** (à quelques centimètres de profondeur). De l'eau s'accumule ainsi à ce niveau et **ruisselle** selon la **pente**. Via cet **écoulement**, les eaux sont transférées vers les **rivières**. Le transfert des nitrates par **ruissellement** est d'autant **plus important** que **l'intensité des précipitations** est forte. **L'état hydrique du sol** joue également un rôle puisque **plus le sol est saturé, plus le ruissellement** sera important.

L'infiltration : Les **eaux infiltrées** traversent la **zone non saturée** qui est la zone située entre la **base du sol** et la **surface de la nappe**. L'épaisseur de ce milieu est variable (**quelques dm** à **plusieurs dizaines de m**). Lors d'une **infiltration**, la **teneur en eau** dans le **milieu non saturé**

augmente. Lorsque la teneur en eau excède cette **capacité de rétention** du milieu, l'eau descend sous **l'effet de la gravité**, donc **s'infiltre**, et humidifie les couches inférieures.

La probabilité de dépasser la **capacité de rétention** du milieu augmentant avec **l'infiltration**, plus celle-ci est importante, plus la **vitesse de transfert** des solutés à travers la **zone non saturée** est **conséquente**. La **zone non saturée** est cependant globalement caractérisée par des **vitesse de transfert** des **solutés** faibles (quelques dm. an⁻¹). Tout comme le **sol**, la **zone non saturée** peut être le siège de **transformations bio-physico-chimiques** impliquant les **nitrate**s. Cependant, ces réactions sont bien **moins prononcées** que dans le **sol**. Il est donc plus courant de considérer la **zone non saturée** comme une **zone de transfert de polluants** plutôt que comme un milieu où les nitrates sont impliqués dans des **réactions bio-physico- chimiques**.

Une fois dans la nappe, les nitrates peuvent être transférés aux rivières par les **échanges régissant** entre ces deux compartiments. Ils peuvent également être réduits naturellement par une **dénitrification** dans la **zone saturée**.

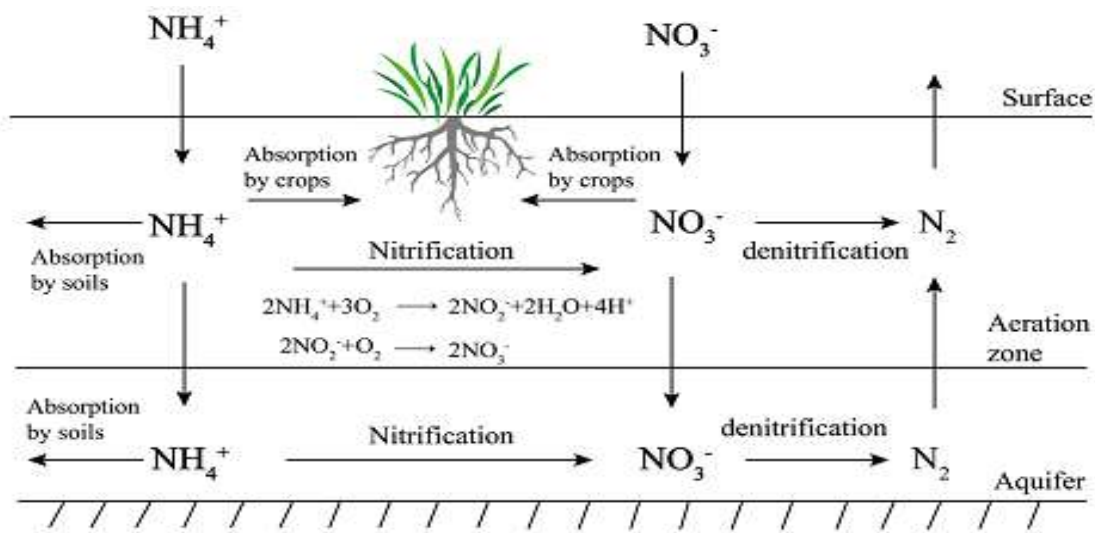


Figure 7. Schéma réactionnel de la minéralisation de l' azote

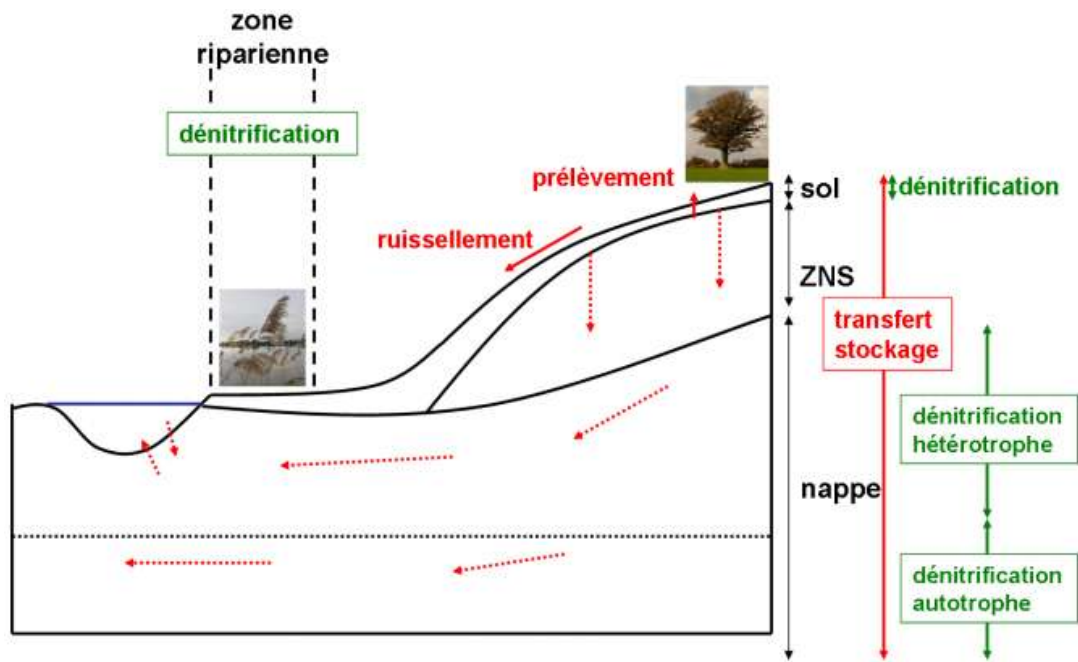


Figure 8. Représentation simplifiée des transferts d'azote vers les eaux souterraines

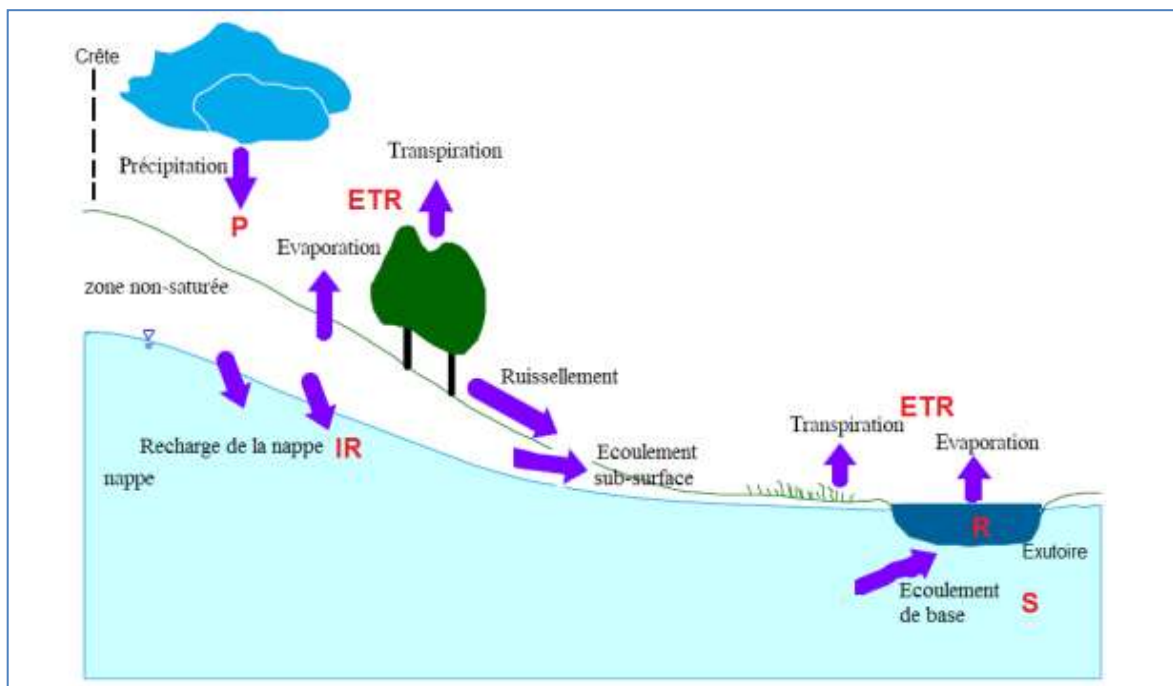


Figure 9. Schéma type des différents mécanismes hydrologiques sur un bassin versant (Merrien-Soukatchoff, 2011)

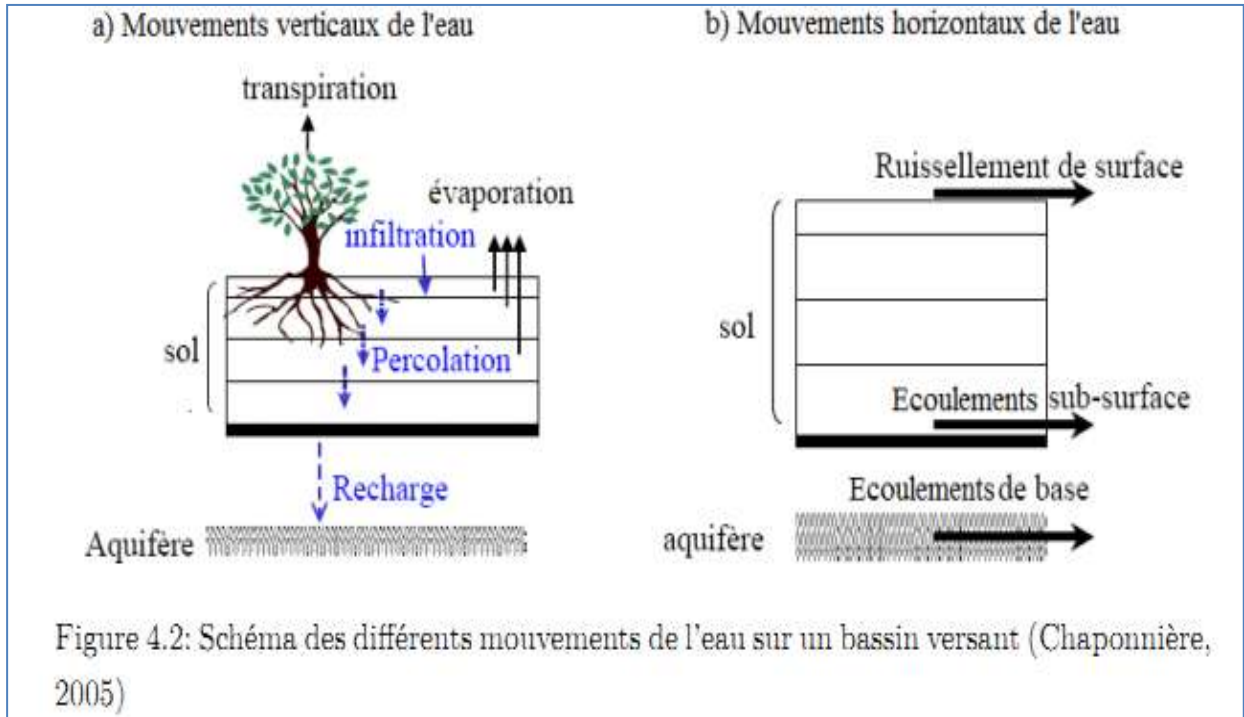


Figure 10. Schéma des différents mouvements de l'eau sur un bassin versant (Chaponnière, 2005)