

# MODULE



## CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES AQUIFÈRES POUR LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES







# CONTENU

## MODULE 3

### Caractérisation des Systèmes Aquifères pour la Gestion des Eaux Souterraines

3.1	Introduction	4
3.2	Formation de l'eau souterraine	4
3.3	Écoulement des eaux souterraines	9
3.4	Bilan et recharge des eaux souterraines	10
3.5	L'interaction eau souterraine et eau de surface	14
3.6	Résumé: Problèmes cruciaux de caractérisation des eaux souterraines	20
3.7	References	22
3.8	Exercice	23

## Mentions légales

### © Droit d'auteur 2015, tous droits réservés

L'utilisation du manuel est gratuite. Les utilisateurs doivent toutefois faire référence à la source, comme suit: «L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique - un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, et IGRAC». Les modifications ne sont autorisées qu'avec l'accord de AGW-Net. Les droits d'auteur des photos sont détenus par leurs propriétaires respectifs

A4A – Aqua for All

AGW-Net – Le Réseau Eaux Souterraines en Afrique

RAOB – Réseau Africain des Organismes de Bassin

BGR – Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles

UNDP-Cap-Net

BMZ – Ministère Fédéral de la Coopération Économique et du Développement

GWP – Partenariat Mondial de l'Eau

igrac – Centre International pour l'Évaluation des Ressources en Eau Souterraine

imawesa – Improved Management of Agricultural Water in Eastern and Southern Africa  
(Gestion améliorée de l'eau agricole en Afrique Australe et de l'Est)

IWMI – L'Institut International de Gestion de l'Eau

Equipe de rédaction: Vanessa Vaessen, Ramon Brentführer – BGR

Mise en page: ff.mediengestaltung GmbH, Hannover, Allemagne

Photo: BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe





# CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES AQUIFÈRES POUR LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES

## OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES

Importance de la caractérisation des aquifères dans la gestion des ressources en eau souterraine  
Principales propriétés des aquifères pour une meilleure gestion des eaux souterraines  
Les différents environnements hydrogéologiques en matière de d'exploitation des eaux souterraines  
Présence des eaux souterraines, et interactions entre eau souterraine et eau de surface

### 3.1 Introduction

L'eau souterraine diffère de l'eau de surface du fait de l'environnement (physique et chimique) dans lequel elle se trouve. On trouve de l'eau souterraine dans la plupart des formations géologiques, dans des sédiments et roches formant un réservoir souterrain ou aquifère dans lequel l'eau souterraine peut être stockée et transmise.

Les propriétés hydrogéologiques, la porosité et la perméabilité, des couches géologiques et leur distribution spatiale varient pour diverses raisons, comme la structure tectonique, la position dans le bassin de sédimentation, le type de bassin sédimentaire, la profondeur d'enfouissement et la lithologie. La disponibilité des eaux souterraines dépend du contexte hydrogéologique, qui peut être très variable, même au sein d'une seule formation lithologique.

Compte tenu du fait que l'eau souterraine est généralement une source importante d'eau de surface, en particulier pour le débit de base, les deux sources d'eau (de surface et souterraine) doivent être considérées d'une manière intégrée et globale dans le cadre de la planification des Organismes de Bassin.

La gestion des eaux souterraines dans les bassins versants de rivière et de lac doit être fondée sur une bonne compréhension des caractéristiques du système des aquifère, entre autres son interaction avec les plans d'eau de surface comme les rivières, les lacs et les zones humides.

### 3.2 Formation de l'eau souterraine

#### Diversité dans la mise en place des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont présentes dans les ouvertures de matériaux rocheux que sont les pores ou vides, ou les fractures qui constituent la porosité du matériau. Presque toutes les roches, quelque soit le type, l'origine ou de l'âge, possèdent un certain degré de porosité. Par conséquent, les eaux souterraines peuvent être trouvées dans tous les environnements géologiques. Si l'eau souterraine «utile» se trouve dans un matériau rocheux, cette roche est appelée un aquifère. Un aquifère est défini comme une formation géologique (ou parfois une partie d'une formation ou d'un



groupe de formations) qui contient du matériau saturé, de perméabilité suffisante pour produire des quantités d'eau «satisfaisantes» vers les forages et/ou sources. Des unités aquifères peuvent être combinées dans des systèmes aquifères.

### **Un cadre pour l'évaluation de la présence des eaux souterraines.**

#### **Porosité :**

Une roche peut présenter une porosité «primaire» ou inter-granulaire. Ces sédiments non consolidés sont constitués de grains individuels qui ont été déposés à la surface de la terre par divers processus sédimentaires. La porosité dans les matériaux de porosité primaire est normalement élevée.

Par contre un matériau rocheux peut être imperméable avec une porosité nulle ou proche de zéro. Les roches cristallines qui sont cristallisées à partir d'un magma en fusion forment généralement ces matériaux. Dans ces roches ignées, la porosité est liée à des fractures à travers la masse de roche, plutôt que des pores de la roche intacte. Ce type de porosité est connu comme la porosité secondaire, ou porosité de fracture ; elle est habituellement beaucoup plus faible que la porosité primaire.

Les sédiments meubles deviennent des roches sédimentaires par des processus d'enfouissement, de compactage et de cimentation. Au cours de ces processus, la porosité des roches sédimentaires diminue, la masse rocheuse diminue de volume et devient fracturé. Ces roches sédimentaires fracturées présentent une double porosité.

#### **Perméabilité :**

Pour qu'une formation géologique puisse être considérée comme un aquifère, l'eau doit être en mesure de circuler à travers la roche à un débit satisfaisant de telle sorte que des quantités d'eau appréciables puissent être pompées à partir de forages d'eau. La perméabilité d'une roche est la vitesse à laquelle l'eau s'écoule à travers cette formation géologique.

Pour les roches granulaires de porosité primaire, l'eau s'écoule par infiltration ou écoulement de matrice entre les grains qui constituent la formation géologique. Ce type d'écoulement par infiltration est gouvernée par la taille des interstices entre les grains, ce qui à son tour est régie par la taille des grains. Les matériaux grossiers tels que le sable et le gravier ont une perméabilité élevée, tandis que les matériaux à grains fins tels que les argiles ont une très faible perméabilité.

Les roches cristallines qui n'ont pas de porosité primaire présentent un écoulement de fracture, avec de l'eau qui circule à travers les fractures. Ce type de perméabilité de fracture, ou écoulement de fracture, est généralement plus rapide que l'écoulement d'infiltration; mais parce qu'il se fait par un petit volume de la masse rocheuse, il peut être moins productif, dans certains cas, que l'écoulement d'infiltration.



### Aquifères libre et captif.

Les aquifères peuvent être ouverts à l'atmosphère à travers une couverture de sol perméable; dans ce cas, ils sont dits libres. Un aquifère libre peut recevoir une recharge directe à partir de la percolation et de l'infiltration de la pluie à travers la zone non saturée (ou vadose) vers la nappe phréatique. Ces aquifères sont également connus comme aquifères à nappe phréatique. L'eau, qui est en eux, est à la pression atmosphérique et quand ces nappes sont pompées, leur niveau baisse. Les roches cristallines ont tendance à s'altérer à la surface et près de la surface pour devenir des aquifères libres, cependant elles sont imperméables en profondeur où elles ne sont pas altérées et les fractures sont fermées en raison de la pression de surcharge.

Par contre les aquifères peuvent être enfouis sous des matériaux imperméables. Cela se produit généralement dans les bassins sédimentaires où les couches sédimentaires perméables et poreuses peuvent se retrouver sous des couches imperméables et deviennent isolées de la surface de la terre. Ces aquifères sont connus comme des aquifères captifs. Les aquifères captifs ne reçoivent pas de recharge directe de la pluie parce qu'ils sont séparés de la surface par une couche imperméable. Ils peuvent être rechargés à partir d'un point éloigné où les couches aquifères affleurent à la surface, et à cet endroit l'aquifère devient localement libre. Ils peuvent être entièrement captifs sous des couches imperméables et ne reçoivent pas de recharge du tout. Puisque les aquifères captifs ne sont pas ouverts à l'atmosphère, l'eau qui est en eux, est généralement sous pression résultant du niveau de l'eau dans la zone de recharge. Cette pression est appelée pression piézométrique. Si un forage est foré dans une nappe captive, l'eau monte généralement dans le forage à un niveau au-dessus du toit de l'aquifère en raison de la pression piézométrique. Lorsque l'eau est pompée à partir d'un aquifère captif, la pression piézométrique est réduite, mais la couche aquifère reste totalement saturée.

### La productivité de l'aquifère.

La «productivité» d'un aquifère dépend d'une combinaison de la porosité et de la perméabilité des matériaux aquifères, ainsi que la «taille» de l'aquifère. Les éléments les plus significatifs de la diversité hydrogéologique naturelle sont :

- Une variation importante de la capacité de stockage des aquifères (porosité / emmagasinement), entre les sédiments granulaires non consolidés et les roches fracturées très consolidées;
- Une variation importante de la capacité de transmettre l'écoulement des eaux souterraines (perméabilité) entre les calcaires karstiques (caverneux) et l'argile dense, ou les roches cristallines intactes solides;
- Une grande variation aussi bien de l'extension de l'aquifère, que de son épaisseur saturée, qui dépendent des environnements géologiques; ceux-ci peuvent être très divers : par exemple, on peut avoir des roches cristallines altérées à régolite, des sédiments alluviaux peu profonds, ou des profonds bassins tectoniques; il en résulte un large éventail de capacité de stockage, mais aussi de potentiel d'écoulement des aquifères (transmissivité).



Les aquifères sédimentaires non consolidés sont composés principalement de matériaux meubles : sables, graviers, limons, sable argileux, argiles sableuses et argiles. Ils constituent un milieu poreux et continu. Les eaux souterraines sont stockées et transmises par les pores.

Les bassins sédimentaires contiennent généralement de grandes ressources en eau souterraine; deux types d'environnements hydrogéologiques sont le plus souvent d'excellents aquifères :

- Les bassins alluviaux côtiers qui sont de grands aquifères prolifiques;
  - Les roches sédimentaires consolidées comme le grès et le calcaire.
- Ils sont spatialement étendus, disposent de grandes épaisseurs, et contiennent de grands volumes de stockage d'eau souterraine avec un écoulement régional. Ils constituent les principaux aquifères transfrontaliers.

Les roches compactes et fracturées ou formations consolidées ont des vides qui sont principalement composés de fractures; elles constituent le plus souvent un milieu discontinu. En général, on peut identifier deux grands types de formations :

- Les roches carbonatées, comme le calcaire, qui sont légèrement solubles dans l'eau de pluie et donc les fractures peuvent être agrandies pour former des karsts (canaux) ;
- Les roches anciennes cristallines et métamorphiques peuvent être fortement fracturées; elles peuvent aussi subir une altération dans la partie supérieure pour former un manteau poreux et perméable composé de matériaux altérés (régolite) de quelques dizaines de mètres d'épaisseur.

La caractérisation de la présence des eaux souterraines peut se faire à différentes échelles d'investigation, elle est généralement liée au type de formation géologique.

- Les bassins hydrogéologiques qui coïncident avec les limites topographiques des bassins versants; ils sont généralement dans des terrains rocheux cristallins et peuvent être constitués de plusieurs sous-bassins.
- Les bassins hydrogéologiques qui sont plus petits et qui tiennent entièrement dans un bassin hydrologique; ce sont généralement des bassins sédimentaires locaux, ou des systèmes alluviaux liés à l'hydrologie actuelle.
- Les aquifère ou unités hydrogéologiques qui s'étendent au-delà des frontières du bassin hydrologique; généralement ce sont des grands bassins sédimentaires qui datent d'avant l'actuel et se sont constitués avant le climat actuel..

Cette diversité hydrogéologique peut être résumée par les éléments clés qui identifient la plupart des types d'aquifères (figure 3.1). La capacité de stockage de l'aquifère et l'importance (longueur et le temps de séjour) des trajectoires de l'eau sont les deux éléments utilisés ici pour la caractérisation des eaux souterraines à des fins de gestion.

**Quel type (s)  
d'aquifère est  
présent dans votre  
bassin et à quelle  
profondeur sous la  
surface du sol?**

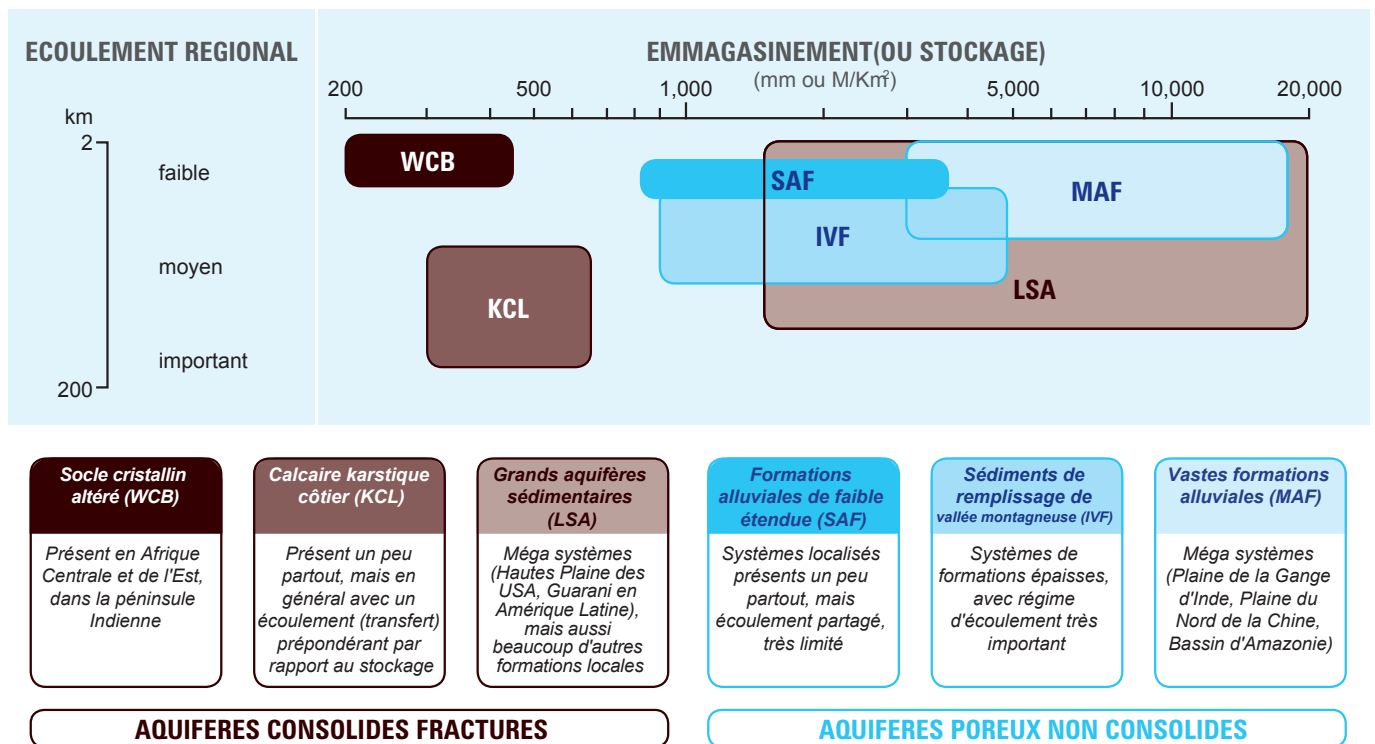


Figure 3.1: Résumé des principales propriétés des aquifères les plus fréquents. (GW- Mate Briefing note 2)

En termes généraux, les “aquifères mineurs (de faible extension)” ont des capacités de production plus faibles et moins prévisibles que celles des “aquifères majeurs (large extension)”; ils possèdent beaucoup moins de stockage et peuvent être assez irrégulier en extension spatiale. Dans les régions où sont présents les “aquifères mineurs”, l’implantation de forages fournissant un débit fiable, de qualité acceptable et en quantité suffisante, peut être un défi hydrogéologique important; mais les “aquifères mineurs” sont souvent la seule source disponible sur de très grandes superficies.

### Quelles sont les fonctions clés des aquifères?

Un aquifère, assimilé à une unité hydrogéologique, est constitué de deux phases principales qui interagissent : un réservoir comprenant une ou plusieurs formations géologiques et l’eau souterraine stockée dans le réservoir.

Le réservoir a deux fonctions importantes :

- une **capacité de stockage** des eaux souterraines exprimée par le coefficient d’emmagasinement ou la porosité efficace;
- une capacité de **transfert de l’écoulement de l’eau** souterraine par gravité ou sous pression, qui peut être exprimée par la transmissivité ;

Une de ces fonctions peut prédominer sur l’autre, dépendant des types de roches et des environnements hydrogéologiques. Par exemple, un aquifère le long d’une rivière a principalement une capacité de transfert, alors qu’une nappe aquifère profonde et captive présente essentiellement une capacité de stockage, mais avec un écoulement plutôt limité; un aquifère libre peut avoir les deux fonctions.





Le grand volume d'eau en stockage dans les systèmes aquifères (dont l'amplitude varie de façon significative avec le contexte géologique) est habituellement leur atout le plus précieux. Ce capital de stockage comprend non seulement les eaux souterraines déjà stockées dans les systèmes aquifères, mais aussi la capacité de stockage potentiel de leurs espaces vides qui peuvent recevoir la recharge.

### 3.3 Écoulement des eaux souterraines

Comment se fait l'écoulement des eaux souterraines?

L'eau souterraine s'écoule suivant un gradient, des zones de charge hydraulique élevée vers les zones de charge inférieure. La vitesse d'écoulement est régie par le gradient et par les propriétés de l'aquifère. La plupart des eaux souterraines sont en mouvement lent et continu (figure 3.2) des zones de recharge naturelle de l'aquifère provenant de la pluie, vers, d'une part les zones de décharge de l'aquifère, comme les sources, et d'autre part les émergences vers les rivières / lacs, les zones humides et zones côtières. L'écoulement des eaux souterraines est régi par la loi de Darcy (Encadré 3.1).

L'écoulement naturel des eaux souterraines se produit, généralement à faible vitesse, à travers les pores et fractures de matériaux rocheux. Pour les eaux souterraines une vitesse de 1 mètre par jour d'écoulement est élevée, et il peut être aussi faible que 1 mètre par an ou 1 mètre par décennie. En revanche, les vitesses des fleuves sont généralement mesurées en mètre par seconde.

*Pouvez-vous identifier les zones de réalimentation et de décharge, et le régime d'écoulement d'un aquifère dans votre bassin?*

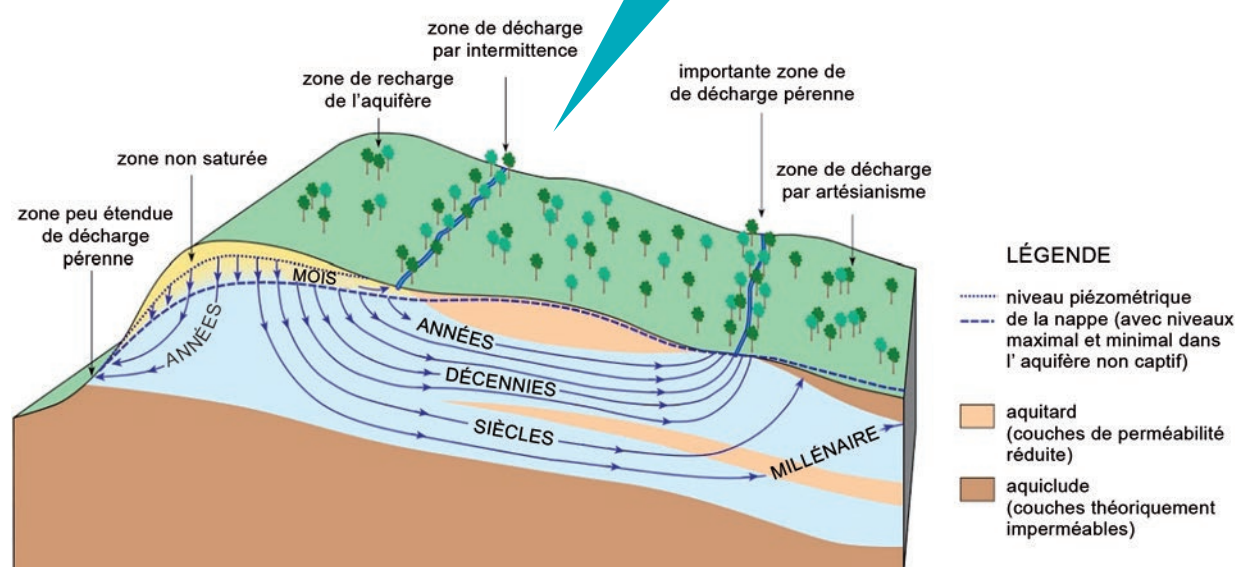


Figure 3.2: Régime d'écoulement type et temps de séjour des eaux souterraines dans les régions semi-arides (Foster and Hirata, 1988)



### ENCADRÉ 3.1: LA LOI DE DARCY ET PERMÉABILITÉ

La loi de Darcy régit la façon dont les fluides se déplacent à travers les sédiments et les roches - le débit étant proportionnel à la longueur de la trajectoire d'écoulement, à la différence de pression entre deux points de la trajectoire d'écoulement, et à la perméabilité du médium aquifère.

La loi de Darcy est généralement exprimée comme suit :  $Q = -KA \frac{dh}{dl}$  où:

**Q = Débit d'écoulement des eaux souterraines,**

**K = perméabilité (ou conductivité hydraulique)**

**A = section transversale d'écoulement**

**$dh/dl$  = gradient de pression hydraulique.**

Dans le sous-sol, les sédiments sont habituellement déposés en couches horizontales. Des couches de schiste et autres intercalations d'argile ont une perméabilité beaucoup plus faible (en particulier dans la direction verticale) que le principal groupe de matériaux aquifères; ainsi l'écoulement de l'eau souterraine tend à être préférentiellement confiné dans des couches aquifères qui sont généralement horizontales, avec seulement une petite drainance verticale à travers les épontes constituées de lits d'argile ou de schiste.

## 3.4 Bilan et recharge des eaux souterraines

### Quelle est la problématique de l'estimation du taux de recharge actuelle?

L'estimation des taux de recharge contemporaine des aquifères est d'une importance fondamentale si l'on considère la durabilité de l'exploitation des ressources en eau souterraine. En outre, la compréhension des mécanismes de recharge des aquifères et de leurs liens avec l'occupation des sols est essentielle pour la gestion intégrée des ressources en eau.

Malheureusement la recharge des nappes est à la fois très complexe et incertaine. Il existe de nombreuses méthodes, notamment : les mesures de niveau des eaux souterraines, la mesure du flux de la zone non saturée, les techniques isotopiques pour mesurer l'âge des eaux souterraines, la mesure de l'écoulement souterrain, la modélisation et bien d'autres.

*Quelle est la hauteur de pluie dans la zone de recharge de votre aquifère ? Est-ce que la nappe est réalimentée par les précipitations annuelles ?*

Toutes ces méthodes souffrent d'une considérable incertitude scientifique (Figure 3.3) dans la quantification des composantes individuelles de recharge en raison de :

- La grande hétérogénéité, l'irrégularité et la complexité inhérente aux systèmes hydrogéologiques naturels;
- La grande variabilité spatiale et temporelle des événements hydrologiques tels que les précipitations et le ruissellement, de même les cycles climatiques;
- La variété et la complexité des différents processus de recharge allant de l'infiltration directe et la percolation des précipitations, l'infiltration à travers les lits de cours d'eau et de lacs, aux rejets anthropiques;
- Les incertitudes inhérentes à la plupart des procédures méthodologiques utilisées pour l'estimation de la recharge.



Ces facteurs, combinés avec les données limitées de suivi du niveau des nappes dans de nombreuses régions, font que les estimations de recharge disponibles, doivent toujours être traitées avec une certaine prudence.

Néanmoins, pour des raisons plus pratiques, il suffit de faire des estimations approximatives, et les affiner ensuite à travers le suivi et l'analyse de la réponse de l'aquifère aux prélèvements sur le moyen terme. Un certain nombre d'observations générales peuvent être faites sur les processus de recharge des aquifères :

- Les zones, d'aridité croissante, auront une fréquence et un taux de recharge beaucoup plus faibles;
- Les systèmes aquifères captifs et semi-captifs ont généralement des zones de recharge spécifiques là où l'aquifère affleure, alors que les aquifères libres sont souvent rechargés sur toute l'étendue de leur zone d'extension;
- La recharge indirecte par le ruissellement de surface et la recharge artificielle accessoire, découlant de l'activité humaine, deviennent généralement de plus en plus importantes par rapport à la recharge provenant de précipitations directes.

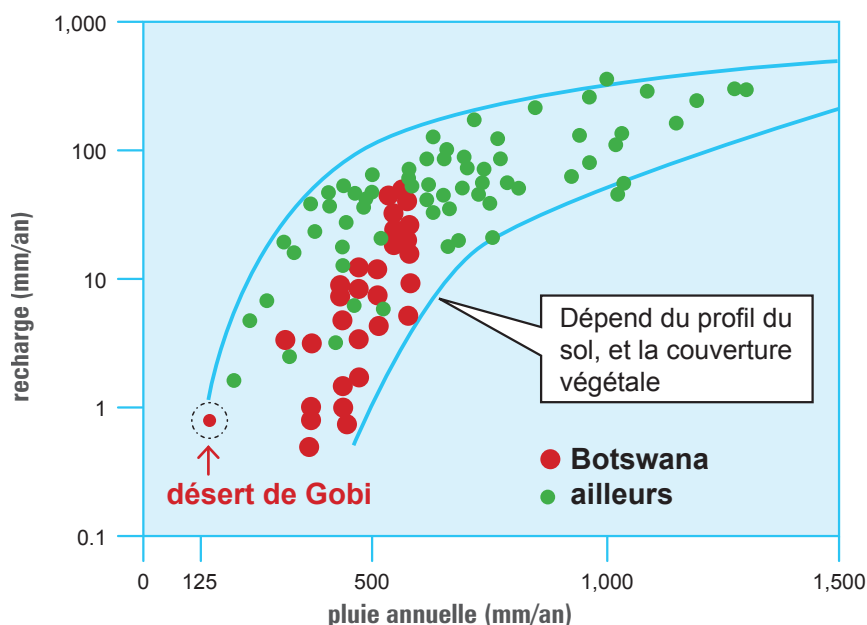


Figure 3.3: Estimations sur le terrain de la recharge diffuse en Afrique Australe et leur relation avec les précipitations annuelles

Lorsque vous essayez d'évaluer les taux de recharge des eaux souterraines contemporaines, il est essentiel d'apprécier pleinement l'importance des liens intimes entre l'occupation des sols et la recharge des nappes souterraines; cet aspect est aussi un élément essentiel dans la pratique de la gestion intégrée des ressources en eau. Le paradigme couramment utilisé de "taux moyens constants de recharge actuelle de l'aquifère" est faux. En réalité, le taux de recharge contemporaine de l'aquifère varie considérablement avec :

- Les changements dans l'occupation des sols et le couvert végétal, notamment l'introduction de l'agriculture irriguée, mais aussi la déforestation et le compactage du sol;



- Les processus d'urbanisation, et en particulier les pertes d'eau du réseau d'alimentation en eau, la proportion d'ouvrages d'assainissement individuel et le degré d'imperméabilisation du sol en raison de l'asphalte, du béton, etc..;
- L'abaissement généralisé de la nappe phréatique par des prélèvements et / ou le drainage des sols, ce qui conduit à l'extension des zones et / ou des taux d'infiltration dans certains systèmes aquifères;
- Les changements dans le régime des eaux de surface, notamment la déviation / détournement de l'écoulement de la rivière.

### **Pourquoi est-il nécessaire de faire un bilan de la nappe d'eau souterraine?**

Pour mieux gérer les ressources, il est important de savoir la quantité d'eau souterraine qui est disponible dans l'aquifère, et qui peut être prélevée de façon durable. Il doit y avoir un équilibre entre le volume de recharge et celui extrait ou sortant de l'aquifère.

Dans la plupart des contextes climatiques naturels, l'eau rentre régulièrement dans le système aquifère par les processus de "recharge naturelle" décrits ci-dessus, et sort en permanence du système comme "décharge naturelle" vers les sources, vers d'autres aquifères, ou reprise par la végétation phréatophyte. Chaque système aquifère est unique dans la mesure où le volume d'écoulement souterrain dépendra de facteurs "externes" comme les quantités de précipitations dans la zone de recharge, la localisation et le comportement des cours d'eau, mais aussi les taux d'évapotranspiration. Mais en mettant de côté pour le moment le changement climatique et les questions liées au changement dans l'occupation des sols, un "système aquifère sain" devrait être en équilibre (ou en état de quasi-équilibre) sur une échelle de temps de 5-25 ans, avec des périodes plus longues dans les climats les plus arides.

Le fait de comptabiliser tous les différents flux entrants et sortants d'un système aquifère, y compris les changements dans la réserve, est appelé entreprendre un bilan de la nappe. L'évaluation du bilan des eaux souterraines est un outil essentiel pour la gestion des ressources en eau souterraine, et pourrait comprendre les éléments suivants :

- L'estimation de la recharge de l'aquifère, qui est une série complexe et incertaine de processus décrits ci-dessus ;
- L'évaluation de la décharge naturelle du système aquifère par le débit de base, débit de la source, et l'évapotranspiration; ce qui est tout aussi complexe, et ;
- Mesurer ou estimer la quantité d'eau souterraine prélevée à partir de forages, et consommée ou exportée du bassin versant local.

Il existe de nombreux outils d'analyse (avec les SIG) qui peuvent grandement aider à ce processus. Les bilans d'eau souterraine devraient être établis pour un système aquifère bien défini ou une nappe d'eau souterraine, dans un bassin versant ou dans certains cas, un sous-bassin appartenant à ce bassin versant. Comprendre le bilan des nappes d'eau souterraine et comment il change en réponse aux activités humaines, est un aspect central et critique de la caractérisation des eaux souterraines.

Tout écoulement souterrain doit «sortir» quelque part, et tôt ou tard les prélèvements continus vont réduire ces débits sortants. Cependant les sources de l'eau souterraine pompée peuvent être complexes, et pourraient prendre en compte une augmentation





de la recharge induite à la suite de la descente du niveau de la nappe phréatique. La question de la baisse continue, à long terme des nappes se pose et le terme “**surexploitation des aquifères**” a été introduit à cet égard.

En pratique, lorsque l'on parle de surexploitation des nappes, nous sommes toujours beaucoup plus préoccupés par les conséquences des prélèvements intensifs des eaux souterraines que par son niveau absolu. Ainsi, la définition la plus appropriée est probablement que le “coût global des impacts négatifs de l'exploitation des eaux souterraines dépasse les bénéfices nets de l'utilisation des eaux souterraines”; mais bien sûr, ces effets ne sont pas toujours faciles à prévoir et / ou à estimer.

Par conséquent, il est crucial pour les gestionnaires des ressources en eau d'estimer le “prélèvement acceptable” (ou “débit de sécurité”) d'un système d'eaux souterraines. En réalité, ces expressions peuvent également être trompeurs, car pour les estimer, il est nécessaire de faire des jugements de valeur sur le terme “acceptable”, qui peut ne pas être acceptable pour certaines parties prenantes, en particulier les écosystèmes naturels qui dépendent de la décharge de l'aquifère.

L'eau souterraine dans les aquifères captifs est généralement plus âgée, moins oxygénée, plus minéralisée, et normalement sous pression. Le rabattement induit par le pompage de la partie captive d'un aquifère se propage souvent rapidement à la partie libre. Dans divers contextes hydrogéologiques, les aquifères libres et peu profonds, et les aquifères profonds et captifs peuvent être superposés, avec une drainance vers le bas ou vers haut, dépendant des conditions locales.

Le stockage souterrain transforme les régimes de recharge naturelle très variables en régimes de décharge naturelle plus stables. Il en résulte aussi des temps de séjour des eaux souterraines qui sont habituellement mesurées en décennies ou siècles (figure 3.2), et souvent même en millénaires, avec de grands volumes de ce qu'on appelle “eaux fossiles”, une relique des épisodes passées avec un climat différent; celles-ci peuvent toujours être stockées (Encadré 3.2).

### ENCADRÉ 3.2: «LES EAUX SOUTERRAINES FOSSILES ET RESSOURCES NON RENOUVELABLES»

Les techniques isotopiques révèlent que la plupart des eaux souterraines stockées (et parfois toujours en écoulement) dans les grandes formations sédimentaires ont été rechargées par des précipitations au Pléistocène supérieur et à l'Holocène inférieur (> 5000 ans BP), alors que le climat dans les régions concernées était plus frais et plus humide. Elles sont donc communément appelées «**eau fossile**».

Si les évidences hydrochimiques suggèrent que très peu de précipitations contemporaines s'infiltrant (par exemple <10 mm / an), la recharge actuelle des nappes sera seulement responsable (au plus), d'une infime partie des eaux souterraines stockées dans ces aquifères. Cette eau souterraine stockée, est donc sensiblement traitée comme une «**ressource non renouvelable**», car elle ne sera pas entièrement renouvelée durant l'exploitation actuelle.



### 3.5 L'interaction eau souterraine et eau de surface

**Presque toutes les eaux de surface (rivières, lacs, réservoirs et zones humides) interagissent avec les eaux souterraines. Ces interactions peuvent prendre plusieurs formes, dans certains cas, les eaux de surface acquièrent de l'eau ou / et des solutés provenant de systèmes d'eau souterraine et dans d'autres, elles peuvent être une source de recharge des nappes et peuvent affecter la qualité des eaux souterraines.**

En ce qui concerne les ressources en eau et l'environnement, il est important de considérer les eaux souterraines et les eaux de surface comme une ressource unique. Par conséquent la compréhension de leur interaction est essentielle pour la gestion des ressources en eau dans les bassins versants fluviaux et lacustres, même si il est difficile d'observer ou de mesurer ces échanges.

La contribution des nappes à l'écoulement total des eaux de surface varie considérablement parmi les écoulements de surface, mais les hydrologues estiment que la contribution moyenne se situe entre 40 et 50% dans les petits et moyens écoulements (USGS, 1999). De même, l'apport de l'eau de surface via l'infiltration, à travers les lits de cours d'eau et de lac, vers les nappes est tout aussi important, en particulier dans les climats arides et semi-arides. Certaines interactions des eaux de surface et eaux souterraines sont décrites ci-dessous.

L'interaction des eaux de surface et des eaux souterraines est souvent une préoccupation majeure pour les organismes de bassin, car ils mettent l'accent sur la gestion des eaux de surface; de telles interactions impactent directement sur les ressources en eau de surface qu'ils ont quantifiées et allouées.

#### **Nappe alluviale dans les vallées fluviales.**

L'eau souterraine dans l'environnement de vallée fluviale tend à se former dans les dépôts alluviaux associés au chenal fluvial (Figure 3.4), et cette eau souterraine est généralement peu profonde et facilement accessible à proximité de la rivière. Ces aquifères ont généralement une extension latérale limitée et une profondeur faible.

Dans de nombreuses régions d'Afrique (Nord Cameroun, bassin du lac Tchad, Botswana) d'épais sédiments déposés dans le chenal de rivières contiennent des quantités importantes d'eau souterraine. Une perméabilité favorable et des caractéristiques particulières de la porosité des sables alluvionnaires du lit, combinées à la recharge régulière provenant de l'écoulement de surface, font que ces aquifères sont très productifs.

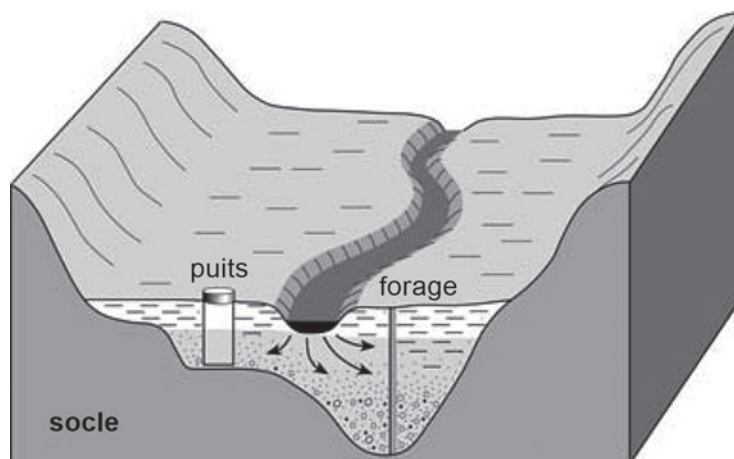


Figure 3.4: L'eau souterraine dans les dépôts alluviaux de rivière (d'après MacDonald, 2005)

Lorsque la saison des pluies est terminée, ces «rivières de sable» ou «oueds» sont généralement à sec, mais les sédiments grossiers sous-jacents du chenal de rivière et des plaines inondables, sont en fait d'importantes sources d'eau domestique et d'irrigation pour les communautés locales (figure 3.5). Dans les grands bassins alluviaux, comme dans la vallée du Nil, les eaux souterraines sont stockées dans des séquences sédimentaires plus vastes et plus épaisses qui forment des aquifères régionaux importants. Ils sont constitués de matériaux non consolidés avec des couches de sable alternant avec du sable argileux ou de l'argile sableuse.

En raison de la proximité immédiate entre les aquifères alluviaux et les chenaux fluviaux, il y a une interaction continue et rapide entre les nappes alluviales et l'écoulement de la rivière. Les prélèvements des eaux souterraines de ces systèmes alluviaux aura une incidence sur le débit du fleuve, ce qui a été évoqué comme une préoccupation croissante par de nombreuses autorités de bassin (Villholth, 2011).



Figure 3.5: Un chenal de rivière avec des dépôts grossiers (Nord Cameroun, photo par Diène, 2013)

**Avez-vous des rivières de sable dans votre bassin?**  
**Comment l'eau souterraine est exploitée à partir de ces aquifères?**



## Comment la nappe souterraine peut interagir avec des rivières et ruisseaux?

Les interactions entre les rivières et les eaux souterraines ont lieu de trois façons :

- Les rivières acquièrent de l'eau provenant du flux entrant des eaux souterraines à travers le lit de la rivière (Figure 3.6), ou;
- Les rivières perdent de l'eau au profit de la nappe phréatique par des flux sortants à travers le lit de la rivière (Figure 3.7), ou;
- Dans certains environnements, les rivières peuvent quelque fois gagner de l'eau provenant de la nappe phréatique, et en d'autres moments, elles pourraient en perdre au profit de la nappe.
- De même, dans certains tronçons fluviaux on peut noter un flux entrant, tandis que sur d'autres tronçons du même système de rivière il peut y avoir perte d'eau.

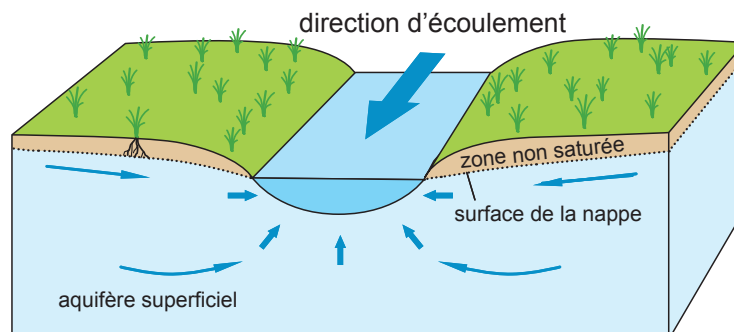


Figure 3.6 : La rivière reçoit de l'eau de la nappe phréatique (USGS, 1998)

Dans le premier cas, le niveau de la nappe phréatique près de la rivière doit être supérieur à celui de la rivière. En revanche pour le second cas (perte d'eau des rivières), le niveau de la nappe phréatique au voisinage de la rivière doit être inférieur à celui de la rivière.

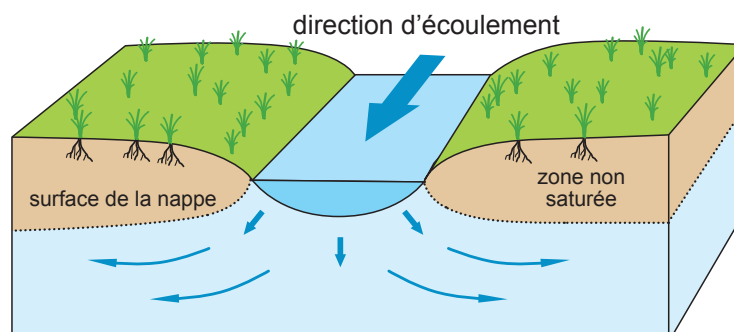


Figure 3.7: Les rivières perdent de l'eau au profit du système des eaux souterraines (USGS, 1998)

**Est-ce qu'il y a des prélèvements importants sur les eaux souterraines le long des chenaux de la rivière dans votre bassin?**

Les ruisseaux qui perdent de l'eau peuvent être reliés à la nappe par une zone saturée continue (Figure 3.7) ou ils peuvent tout aussi être déconnectés par une zone non saturée (figure 3.8). Il y a un type d'interaction entre les eaux souterraines et les rivières qui a lieu souvent à un moment ou à un autre, par une augmentation rapide du niveau de la rivière qui fait que l'eau passe du lit de la rivière aux berges. Ce processus, appelé emmagasinement des berges, est habituellement causée par une pluie abondante, ou des lachers d'eau rapides (par exemple, des barrages hydroélectriques).





Le fait d'exploiter les aquifères peu profonds qui sont directement liés aux eaux de surface peut avoir un effet significatif sur la relation entre ces deux plans d'eau. Les effets de pompage d'un seul forage ou un petit groupe de forages sur le régime hydrologique sont à l'échelle locale. Cependant, les impacts de nombreux forages pompant l'eau d'un aquifère sur de grandes zones, peuvent être d'envergure régionale.

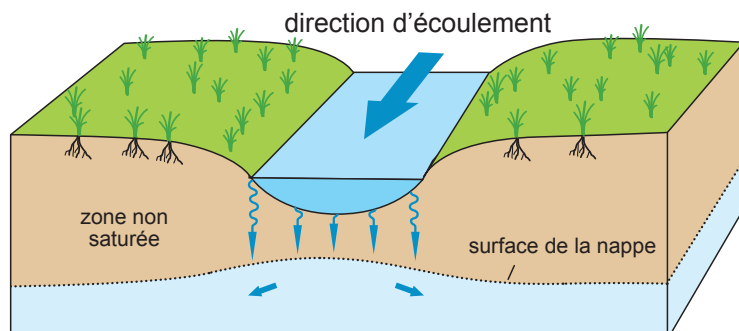


Figure 3.8: Une rivière séparée de la nappe d'eau souterraine par une zone non saturée (USGS, 1998)

### Comment l'eau souterraine peut-elle interagir avec les lacs ?

Les lacs interagissent également avec les eaux souterraines, bien que ces interactions de base soient les mêmes que pour les cours d'eau, elles diffèrent de plusieurs façons. Certains lacs reçoivent de l'eau souterraine à travers la totalité de leur lit; d'autres ont une perte d'infiltration au profit de la nappe dans la totalité de leur lit; mais aussi la plupart des lacs pourraient recevoir un apport d'eau souterraine à travers une partie de leur lit et concèderaient une perte d'infiltration dans autres parties du lit (figure 3.9).

Généralement les niveaux d'eau dans les lacs naturels ne varient pas rapidement comparés aux cours d'eau; donc l'emménagement des berges est relativement moins importante dans les lacs que dans les cours d'eau. En outre l'évaporation a un effet plus significatif sur les plans d'eau des lacs que sur les rivières parce que la surface des lacs est généralement plus grande, mais aussi l'eau du lac n'est pas réapprovisionnée aussi facilement que pour les rivières. Les sédiments lacustres sont souvent épais et ont plus de dépôts organiques. Ces matières organiques peu perméables peuvent affecter beaucoup plus la distribution de l'infiltration dans les lacs que dans les rivières.

Les réservoirs qui sont conçus principalement pour contrôler l'écoulement et la distribution de l'eau de surface sont construits dans des vallées de cours d'eau; ils ont quelques caractéristiques aussi bien pour les rivières que pour les lacs; ils peuvent avoir des niveaux très fluctuants, et un emmagasinement des berges tout aussi important. De plus, comme pour les lacs, les réservoirs peuvent subir une perte d'eau significative, par évaporation.

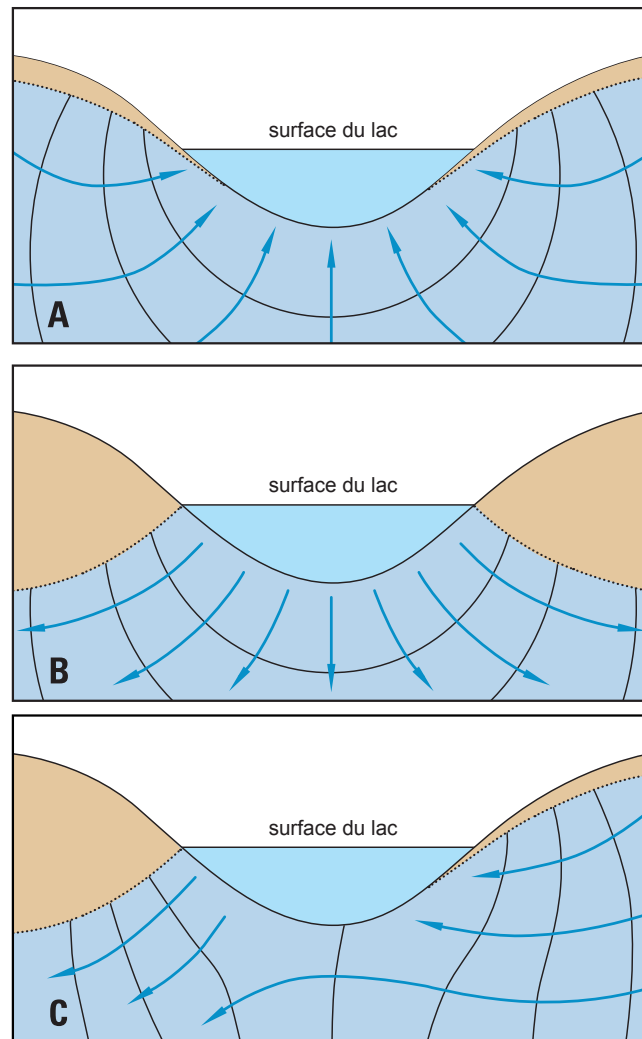


Figure 3.9: Interaction des lacs avec les nappes d'eau souterraine (apport (A), perte d'eau par infiltration au profit des eaux souterraines (B), ou les deux (C))

### Comment les eaux souterraines peuvent-elles interagir avec les zones humides et autres écosystèmes liés aux nappes?

Comme les cours d'eau et lacs, les zones humides peuvent recevoir un apport d'eau souterraine, peuvent aussi recharger les nappes phréatiques, ou les deux (figure 3.10). Les zones humides qui occupent des dépressions sur le continent ont des interactions, avec les eaux souterraines, semblables à celles des lacs et rivières. Cependant les zones humides n'occupent pas toujours les points bas et des dépressions; elles peuvent également se former sur des versants ou même sur une ligne de partage des eaux. Les nappes phréatiques interceptent parfois la surface du sol, provoquant l'émergence d'eau souterraine directement à la surface du sol, ce qui permet le développement de plantes de zones humides.

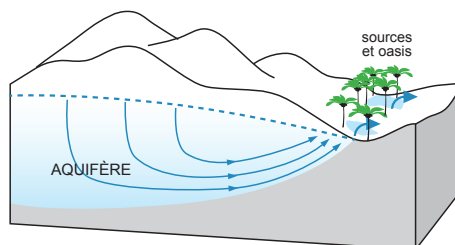
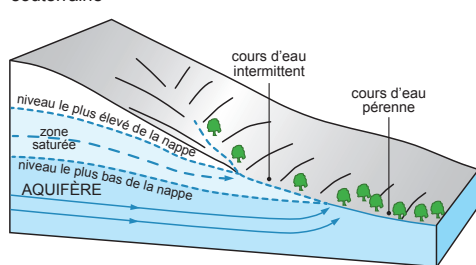
*Est-ce que votre  
Organisme de  
Bassin évalue les  
interactions entre  
les eaux de surface  
et les aquifères peu  
profonds?*

De nombreuses zones humides existent le long de cours d'eau, particulièrement le long de ceux avec un écoulement lent. Bien que ces zones humides riveraines des cours d'eau reçoivent couramment un apport d'eau souterraine, elles dépendent principalement de ces cours d'eau pour leur besoin en eau. Les zones humides dans les parties proches des cours d'eau ont des interactions hydrologiques particulièrement complexes parce qu'elles sont soumises à des variations de niveau d'eau périodiques.



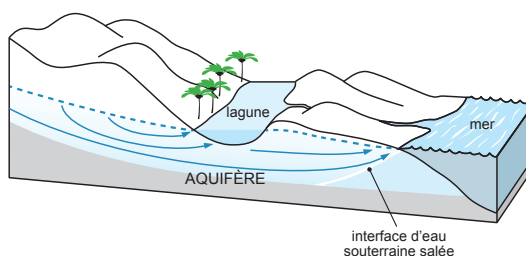
### Ecosystème humide

le long du cours supérieur de la rivière, alimenté par la décharge pérenne et intermittente de la nappe d'eau souterraine



### Ecosystème de zone humide aride

dépendant d'un système d'écoulement des eaux souterraines profondes, parfois avec seulement des eaux souterraines fossiles



### Ecosystème lagunaire côtier

dépendant d'une eau légèrement saumâtre générée par le mélange de l'eau douce souterraine et d'une incursion limitée d'eau de mer

Figure 3.10: Des exemples d'écosystèmes liés aux nappes et des régimes d'écoulement souterrain associées

## Interactions eau souterraine - eau de surface, impacts anthropiques.

En plus des interactions naturelles décrites ci-dessus, il ya aussi beaucoup d'interactions entre l'eau souterraine et l'eau de surface qui sont soit aggravées ou créées par une variété d'activités humaines (figure 3.11).

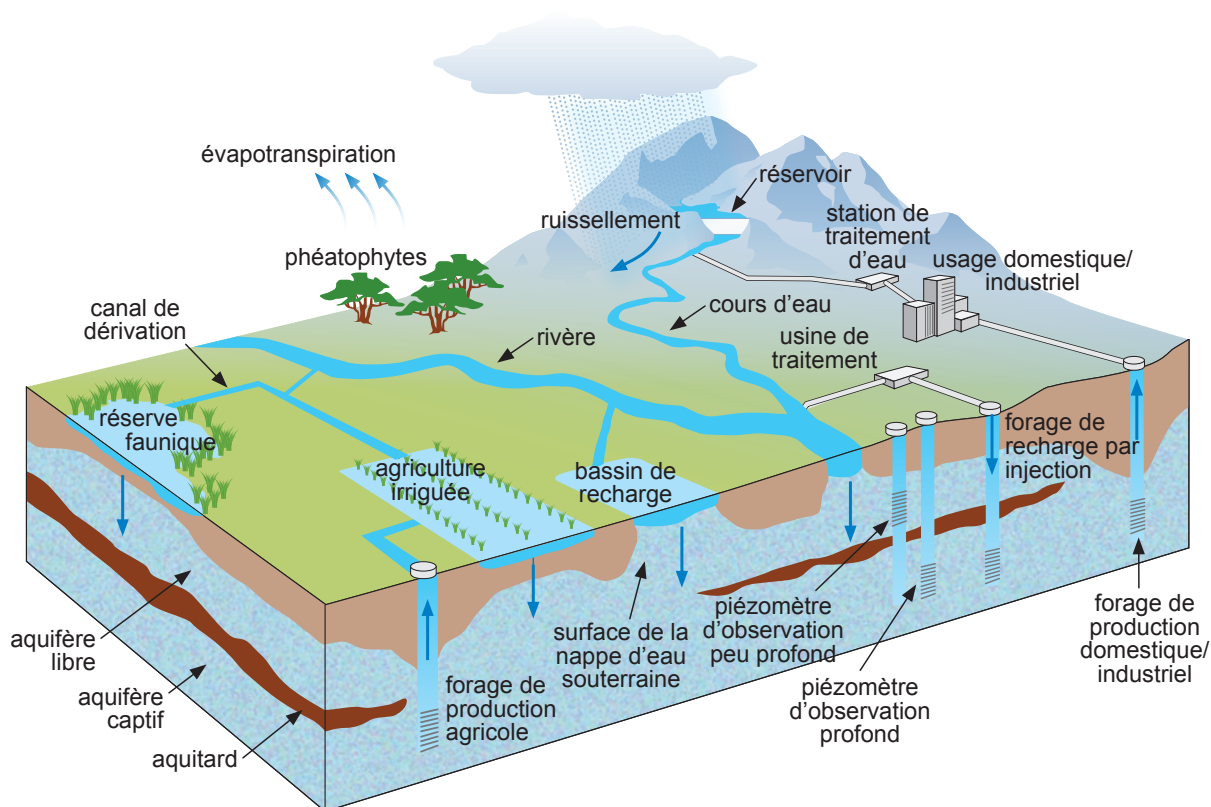


Figure 3.11. Interactions eau de surface - eau souterraine.



Le bloc-diagramme de la figure 3.11 montre quelques-uns des nombreux flux entre le système d'eaux souterraines et l'eau de surface. Le niveau inégal de la nappe montrée, est fortement lié à la direction de ces écoulements. Dans ce schéma, qui pourrait être considéré comme représentatif d'un climat semi-aride, les écoulements naturels proviennent des eaux de surface vers les eaux souterraines, tandis que les apports des eaux souterraines aux eaux de surface le sont par pompage. Dans un environnement humide, l'inverse serait probablement vrai et il y aurait beaucoup de flux naturels des eaux souterraines vers l'eau de surface, par exemple, par le débit de base, les émergences vers les sources ou des zones d'émergence.

Les gestionnaires des Organismes de Bassin doivent être conscients de ces flux et de leurs impacts. Ces écoulements non seulement transfèrent l'eau entre le système d'écoulement souterrain et le système d'eau de surface, mais aussi impactent la qualité de l'eau par le transfert de produits chimiques dissous et de polluants. Dans les environnements urbains et industriels, le flux d'eau polluée entre les eaux souterraines et les eaux de surface est souvent un problème critique de gestion qui doit être résolu par des pratiques de gestion améliorée des déchets, mais aussi par le contrôle et le suivi des pratiques et processus agro-industriels.

### 3.6 Résumé: Problèmes cruciaux de caractérisation des eaux souterraines

La gestion des eaux souterraines dans les bassins versants fluviaux ou lacustres devrait être fondée sur une bonne compréhension des caractéristiques du système des eaux souterraines, en particulier son interaction avec les eaux de surface (rivières, lacs et zones humides). La caractérisation des eaux souterraines implique un certain nombre de questions à savoir :

- Quantification du taux de recharge des nappes phréatiques;
- Identification des principales zones de recharge des nappes, dans le contexte de l'occupation des sols et des sites de décharge de pollution;
- Compréhension de la nature et les mécanismes des interactions entre les eaux souterraines et de surface, et
- Évaluation des impacts de pompage des nappes sur le système des eaux souterraines.

La caractérisation du système des eaux souterraines peut être vérifiée en effectuant des bilans hydriques du système aquifère pour vérifier notre compréhension des entrées et sorties, ou la modélisation des eaux souterraines afin de prédire les impacts des interactions entre eaux souterraines et eaux de surface, d'une part, et l'exploitation des nappes d'autre part.

Il existe cependant un besoin de mécanisme pour fournir, à l'échelon politique, des informations appropriées sur les ressources en eau souterraine pour son exploitation durable et sa protection. Il s'agira d'établir une politiques, des stratégies et des cadres réglementaires, et nécessitera une compréhension adéquate du système des eaux souterraines par l'acquisition d'informations sur la répartition des unités aquifères et la connaissance des propriétés de l'aquifère (Encadré 3.3). La gestion des aquifères exige





aussi la création de mécanismes pour la participation des principales parties prenantes dans la gestion de la demande en eau et de son allocation.

### ENCADRÉ 3.3: LES SOURCES D'INFORMATION POUR LA CARACTÉRISATION DES EAUX SOUTERRAINES

**Les données de base requises sont les suivantes :**

- des cartes hydrogéologiques pour la distribution en 3D de la nappe et les limites de l'aquifère
- des études hydrogéologiques pour les sources / zones de recharge des aquifères et la décharge naturelle
- des données d'occupation des sols pour les zones de recharge
- des essais de pompage des forages pour les propriétés de l'aquifère
- les prélèvements des forages, les données de qualité et d'usage
- les données météorologiques (précipitations, évaporation, etc)
- la surveillance du niveau des nappes d'eau souterraine.

Même si la gestion des eaux souterraines, dans les bassins versants de rivière ou de lac, doit être basée sur une bonne compréhension des caractéristiques du système des eaux souterraines, y compris son interaction avec les eaux de surface (rivières, lacs et zones humides), il ya un certain nombre de difficultés et d'incertitudes qui doivent être prises en compte. Il s'agit, entre autres, du fait que l'eau souterraine est une ressource cachée et ne peut pas être facilement observée; elle peut se former dans de grands et complexes systèmes aquifères qui sont difficiles à caractériser et que les aquifères ont une grande variabilité spatiale dans



## 3.7 References

Batu Vedat, 1998:

**Aquifer Hydraulics. A comprehensive guide to hydrogeologic data analysis.**

John Wiley & Sons, INC.

Castany, G, 1982:

**Principes et méthodes de l'hydrogéologie. BORDAS, Paris**

<http://csenv.free.fr/expos%E9s/hydrog%E9ologie/hydrog%E9ologie.htm>

Foster, S. S. D., and Hirata, R. A.. 1988.

**Groundwater Pollution Risk Assessment: A Methodology Using Available Data.**

Lima, Peru: WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Peru.

GW•MATE, 2002-2006,

**Briefing Notes 2,13 & 14.**

<http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTWAT/0,,content-MDK:21760540~menuPK:4965491~pagePK:148956~piPK:216618~theSite-PK:4602123,00.html>

MacDonald, A., Davies, J., Calow, R., and Chilton J., 2005:

**Developing Groundwater. A guide for Rural Water Supply.**

YIDG Publishing.

Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J., Chorus, 2006:

**Protecting Groundwater for Health.**

**Managing the quality of Drinking-water source.**

WHO, IWA Publishing.

[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/PGWsection1.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/PGWsection1.pdf)

Tuinhof A, Foster S, Steenbergen F van, Talbi A & Wishart M 2011

**Appropriate groundwater management for Sub-Saharan Africa—in face of demographic pressure and climatic variability.**

GW-MATE Strategic Overview Series 5. World Bank (Washington DC—USA).

USGS, 1998:

**Groundwater and Surface water, a single resource.**

U.S. Geological Survey Circular 1139, by Thomas C. Winter, Judson W. Harvey, O.

Lehn Franke, and William M. Alley

USGS, 1999:

**Sustainability of groundwater resources.**

U.S. Geological Survey Circular 1186, by William M. Alley, Thomas E. Reilly, O. Lehn

Franke

Villholth K. 2011.

**Needs Assessment to Support Groundwater Management in the Lake and River Basin Organisations of Africa.** Final Report (unpublished). BGR / AGW-Net



## 3.8 Exercice

### **But :**

Apprécier le lien entre les eaux souterraines et la gestion des eaux de surface

### **Durée:**

60 Minutes

### **Activité:**

En 3 groupes: Discuter de l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans votre bassin versant :

- Avez-vous des connaissances sur la façon dont elle affecte la rivière, le lac ou les zones humides dans votre bassin?
- Quels sont les processus naturels ou les activités humaines qui affectent ces interactions?
- Quelles mesures votre Organisme de Bassin a prises (ou devrait prendre) pour évaluer ou améliorer la caractérisation des relations eau souterraine et eau de surface?
- Faire des recommandations sur la façon dont l'eau souterraine et l'eau de surface doivent être gérées ensemble au sein de votre bassin versant.

### **Compte rendu :**

Chaque groupe présente ses recommandations suivies d'une discussion générale.



Implemented by



RESEARCH  
PROGRAM ON  
Water, Land and  
Ecosystems

Led  
by:

