

Généralités sur les relations nappes rivières

Eaux souterraines et eaux de surface sont deux états de la ressource en eau, deux phases du cycle de l'eau. Elles présentent des relations et une interdépendance hydrologique si étroite qu'en fait toutes deux constituent une ressource unique (Castany, 1965). L'article qui suit est en grande partie extrait de la synthèse bibliographique de référence concernant les relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associé, réalisée par Vernoux et al. en 2011 (Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE, rapport BRGM/RP-57044-FR, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57044-FR.pdf>).

PRESENTATION

La relation nappe-rivière se définit comme un échange d'eau dans un sens ou dans l'autre entre une nappe d'eau souterraine et un cours d'eau (Illustration 1 & Illustration 2). Suivant le niveau de la ligne d'eau, et les saisons, la nappe alimente le cours d'eau ou est alimentée par celui-ci notamment lors des inondations.

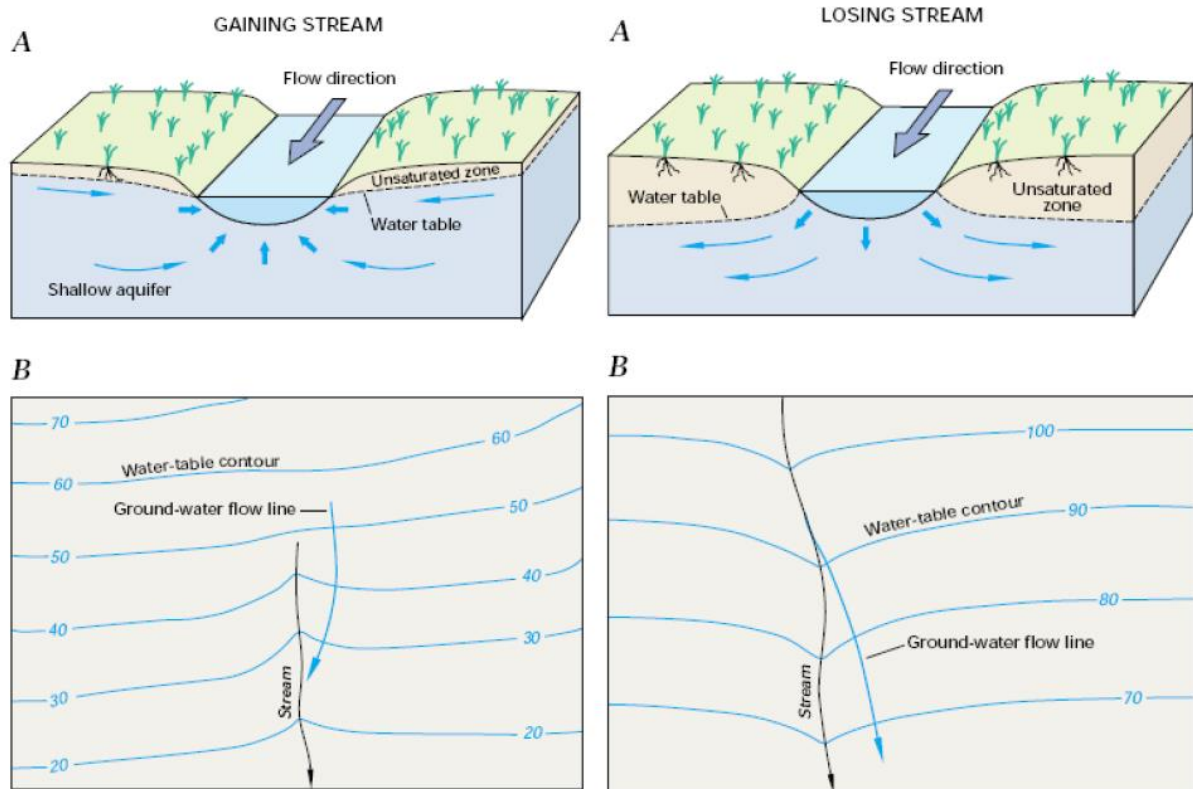


Illustration 1 – Echanges nappe-rivière : la nappe alimente la rivière (Winter et al., 1998)

Illustration 2 - Echanges nappe-rivière : la rivière alimente la nappe (Winter et al., 1998)

SIGES Seine-Normandie

QUELQUES DEFINITIONS

La nappe d'accompagnement est la nappe ou partie de nappe souterraine qui est en forte liaison hydraulique avec un cours d'eau permanent et dont l'exploitation peut avoir un effet préjudiciable (supérieur à un seuil à définir) sur le débit d'étiage du cours d'eau. Ce préjudice consiste, selon le sens d'écoulement des eaux souterraines, soit en une réduction de l'apport de la nappe souterraine au cours d'eau, soit en une réalimentation induite de la nappe par le cours d'eau. Cette notion de nappe d'accompagnement pose problème dans la mesure où elle dépend du régime de prélèvement. Une délimitation fixe et absolue d'une nappe d'accompagnement du côté opposé au cours d'eau, notamment dans le cas d'aquifère étendu, n'est donc pas possible

Le terme « zone hyporhéique » est défini comme l'interface des eaux superficielles et souterraines (Illustration 3). La zone hyporhéique a un fonctionnement très dynamique, dans ses dimensions verticale, latérale et longitudinale du cours d'eau. Le sens et l'intensité des échanges entre l'eau de surface et la nappe souterraine dépendent de la perméabilité de cette zone et des gradients hydrauliques des écoulements. Il existe plusieurs définitions et modèles conceptuels de cette zone (Environment Agency, 2005), qui varient en fonction des disciplines scientifiques, selon que l'on se place sous l'angle des processus hydrologiques, hydrogéologiques ou écologiques. Pour les hydrogéologues, la définition peut être purement quantitative : c'est la zone au sein de laquelle les eaux de surface sont supérieures à 10 % du volume total présent (Triska et al., 1989). La zone hyporhéique est également définie comme une zone de mélange entre des eaux (souterraine et de surface) qui ont la plupart du temps des signatures géochimiques différentes. De plus l'eau souterraine se caractérise plutôt par un faible taux de carbone organique et une faible activité microbactérienne alors que pour les sédiments hyporhéiques, c'est plutôt l'inverse. Du coup, on peut considérer qu'il y a des possibilités importantes de réactions biochimiques pour des substances polluantes transportées de l'aquifère vers la zone hyporhéique ou vice et versa, et donc d'atténuation naturelle.

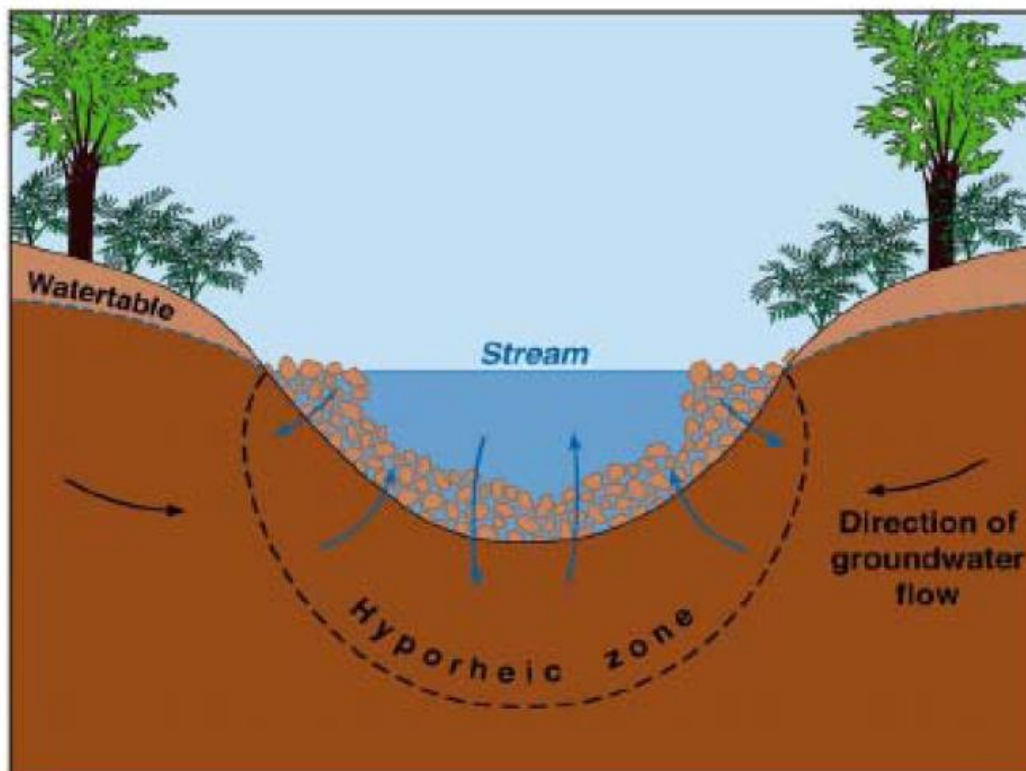


Illustration 3 – La zone hyporhéique (Environment Agency, 2005 dans Vernoux et al. 2010)

LES RELATIONS QUANTITATIVES

La composante du débit du cours d'eau

Dans les conditions naturelles, le débit d'un cours d'eau peut être ramené à la somme des débits de deux composantes :

- une composante rapide correspondant au ruissellement superficiel (compartiment superficiel) et à la composante rapide des écoulements karstiques (compartiment souterrain);
- une composante plus lente correspondant au drainage des aquifères (compartiment souterrain correspondant au débit de base de l'illustration suivante).

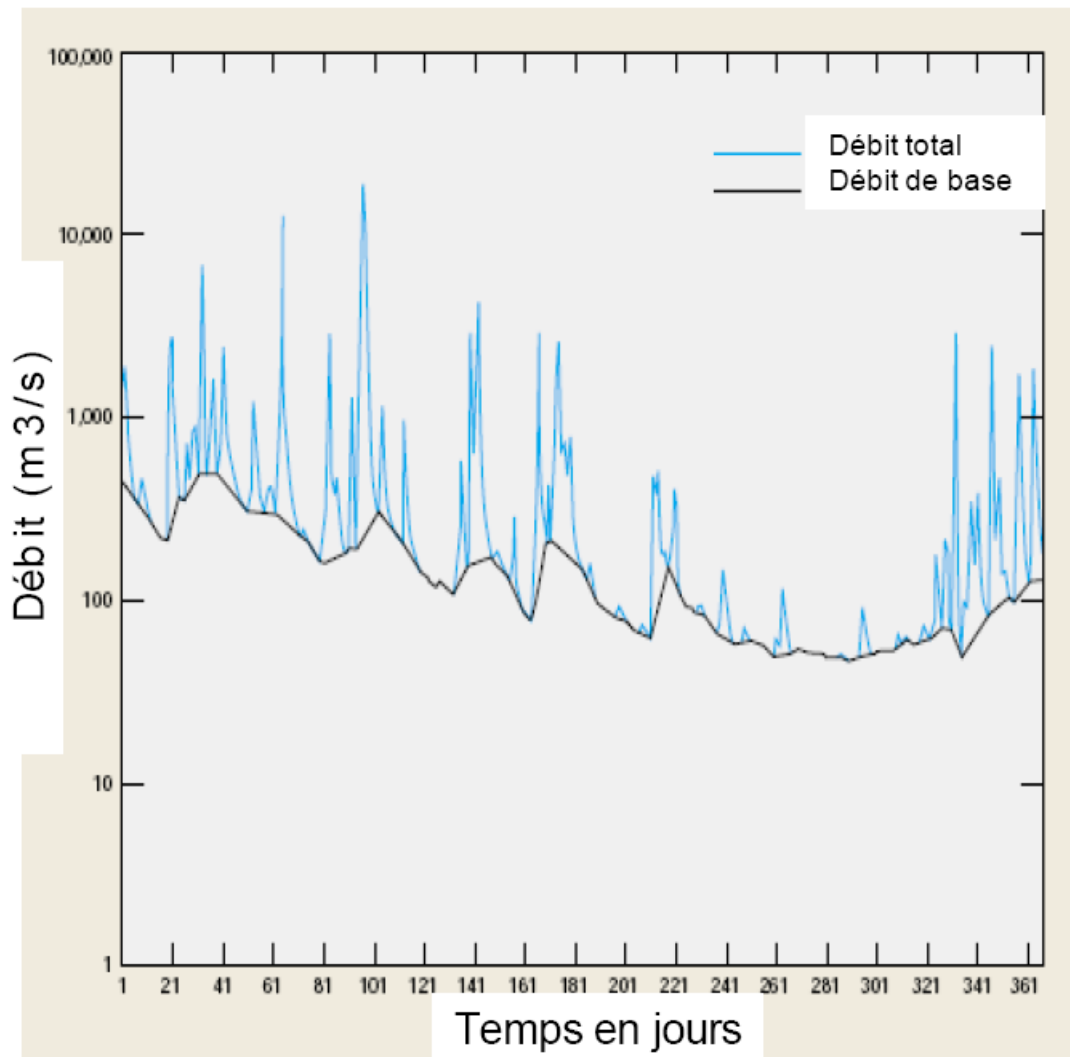


Illustration 4 : Composante eau souterrain du débit d'un cours d'eau (Vernoux et al., 2011)

Les échanges entre les cours d'eau et les aquifères (hors aquifères des alluvions) se font soit directement lorsque les alluvions sont peu ou pas développés et que le cours d'eau est en contact direct avec l'aquifère soit par l'intermédiaire des aquifères des alluvions.

SIGES Seine-Normandie

Les facteurs géologiques et morphologiques

Différents facteurs de nature morphologique (terrasses alluviales) et géologique (lithologie des alluvions et des terrains encaissants) interviennent dans les relations nappe-rivière. Ils sont illustrés par le schéma général ci-dessous (Illustration 5).

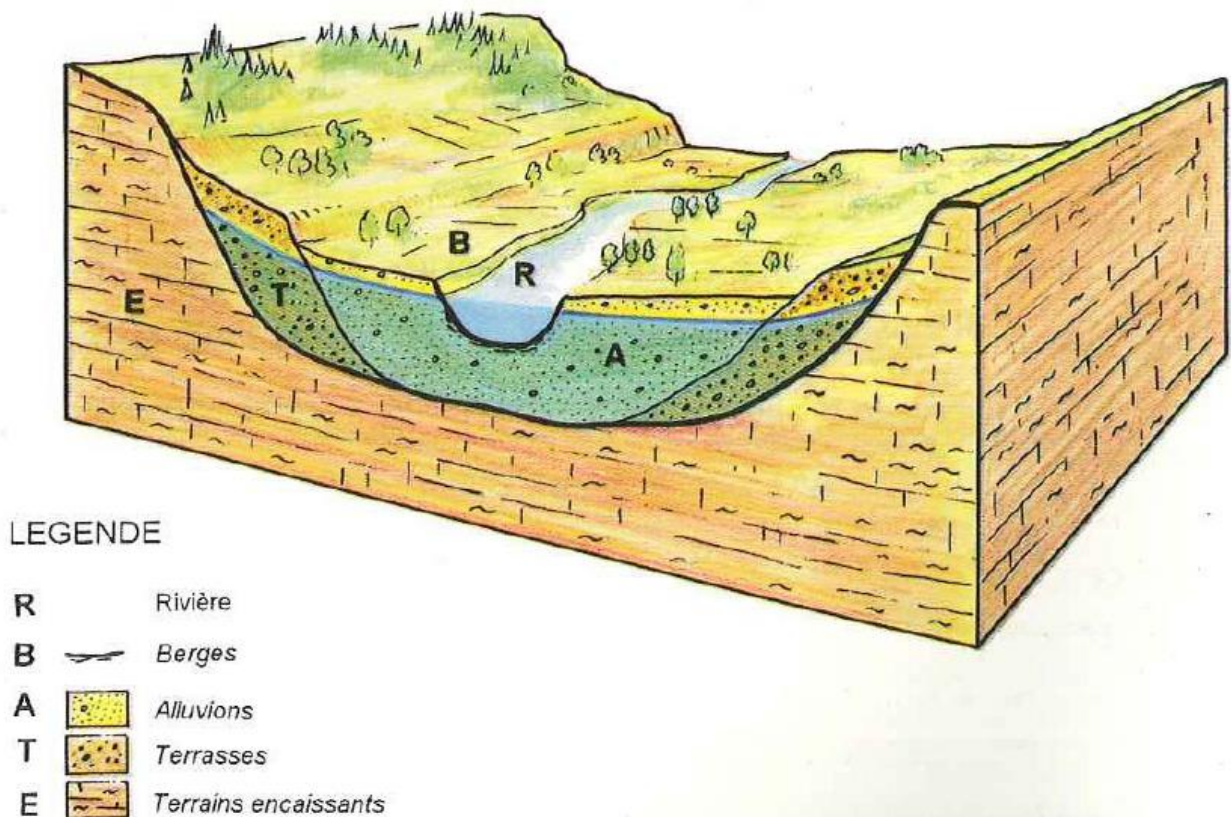


Illustration 5 – Coupe type d'une nappe alluviale (Daum et al., 1997 dans Vernoux et al., 2010)

Différents cas peuvent se déduire de ce schéma à caractère général suivant que les éléments B, A, T, et E (Illustration 6) :

- existent ou n'existent pas (le substratum existe toujours) ou n'existent que sur une rive ;
- sont représentés par des formations perméables ou non ;
- ou sont eux-mêmes composés de plusieurs formations lithologiques distinctes.

La nappe d'accompagnement, quelle que soit la définition de son extension au sens hydrodynamique, pourra alors être contenue dans une seule ou plusieurs formations correspondant à ces différents éléments. Dans certains cas la nature imperméable d'un élément constituera la limite aussi bien au sens géologique qu'hydrodynamique.

SIGES Seine-Normandie

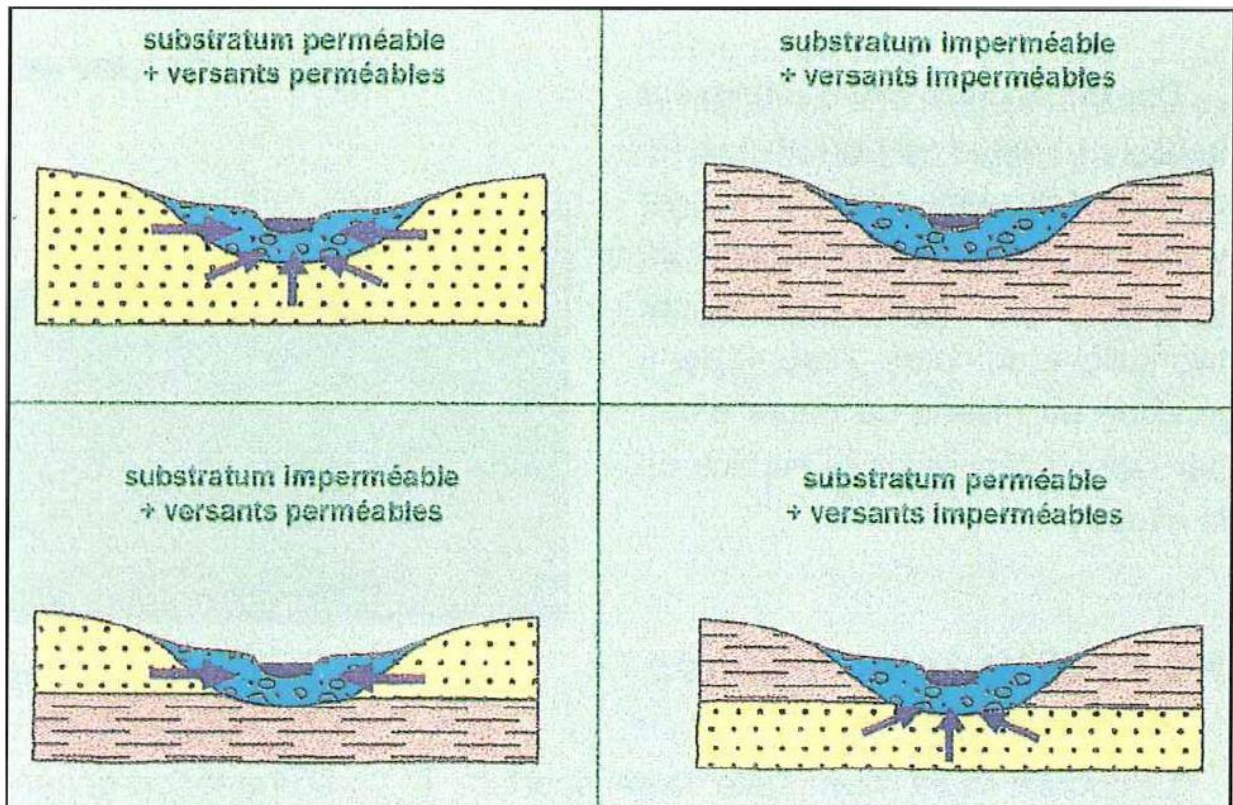


Illustration 6 - Relation d'une nappe alluviale avec les terrains encaissants (Daum et al., 1997 dans Vernoux et al., 2010)

Les facteurs hydrodynamiques

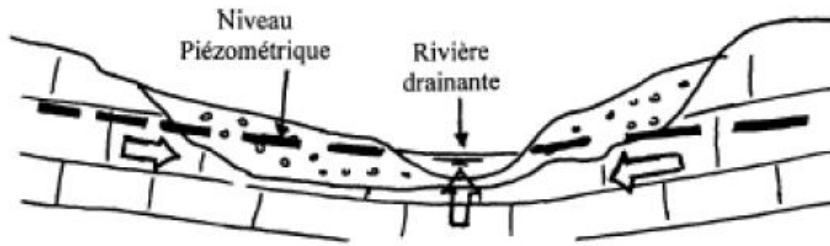
On considère trois cas de relation hydrodynamique entre la nappe et la rivière :

- La nappe est en relation avec la rivière et l'alimente ; le niveau piézométrique est supérieur à l'altitude du plan d'eau ; la rivière constitue pour la nappe une limite imposée à condition de potentiel ;
- La nappe est en relation avec la rivière et est alimentée par la rivière ; le niveau piézométrique est inférieur à l'altitude du plan d'eau ; la rivière constitue pour la nappe une limite à condition de flux ;
- Pas d'échange entre la rivière et l'aquifère (domaine non aquifère ou aquifère avec des berges colmatées).

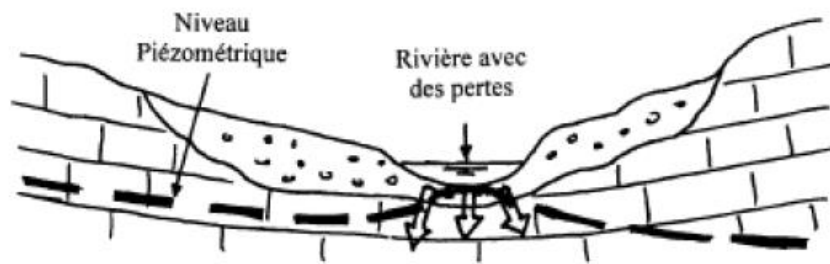
Ces trois types de relation peuvent se rencontrer le long d'un même cours d'eau (Illustration 7).

Pour une même portion de rivière, ces relations peuvent changer dans le temps en fonction des conditions hydrologiques et hydrogéologiques. Schématiquement, en état non influencé par des facteurs anthropiques (prélèvements), la nappe alimente la rivière en période d'étiage et la rivière alimente la nappe en période de crue. Dans le cas de prélèvements importants dans la nappe, notamment agricoles en période estivale, la rivière (et les zones humides associées) peut venir au contraire alimenter l'aquifère.

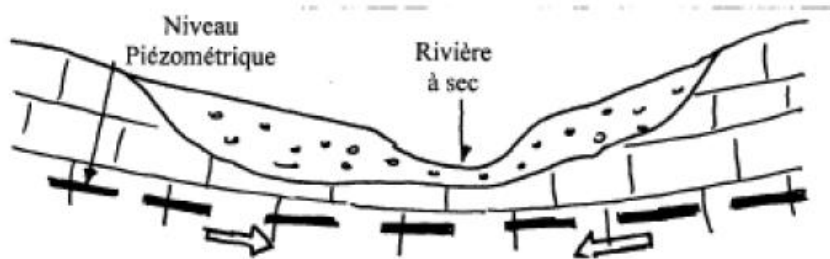
SIGES Seine-Normandie



Secteur amont : la rivière draine la nappe
(limite à condition de potentiel)



Secteur médian : la rivière est perchée et s'infiltré dans la zone non saturée de l'aquifère
(limite à condition de flux)

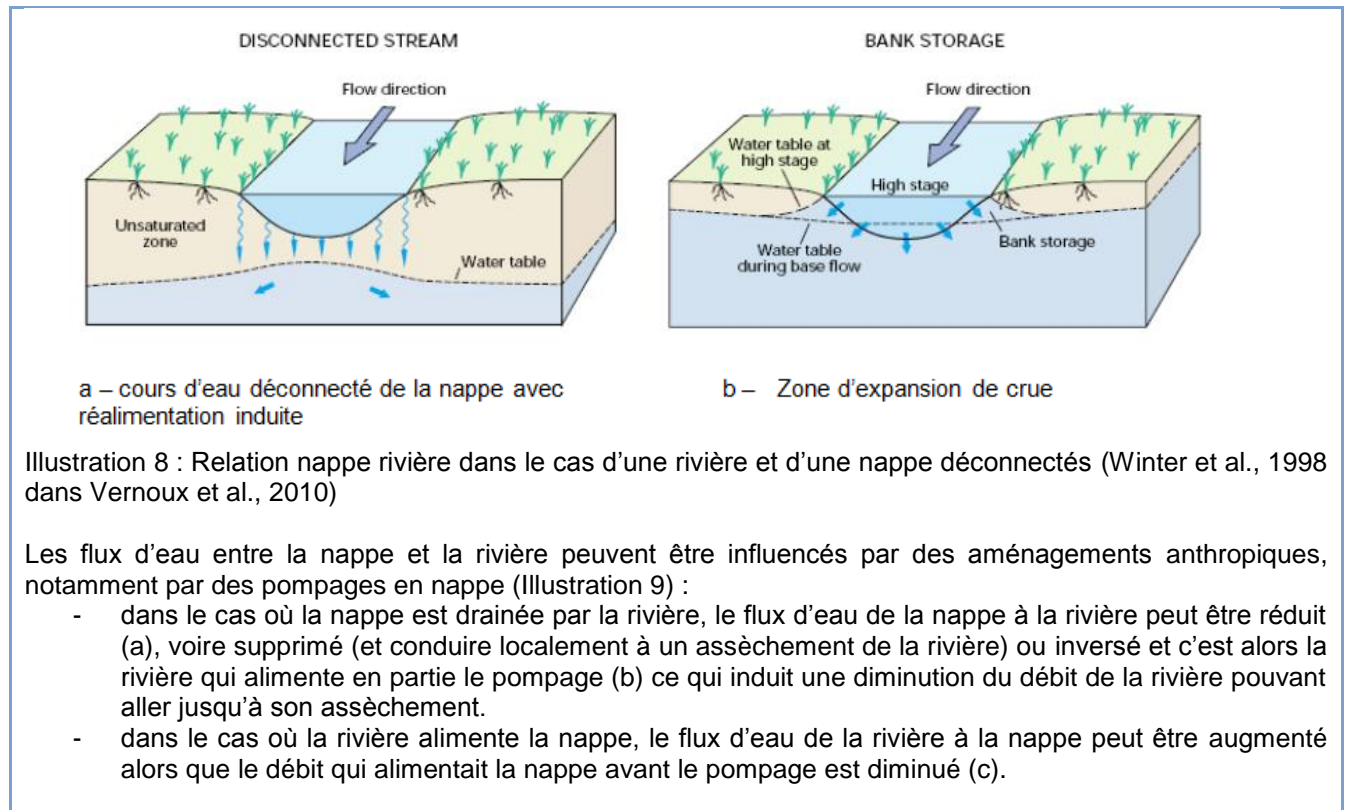


Secteur aval : la rivière est asséchée
(absence de limite)

Illustration 7 – relations hydrodynamiques entre la nappe et la rivière : exemple de la Boutonne (Charente Maritime)

On peut avoir un cas intermédiaire où le cours d'eau est déconnecté de la nappe mais avec une alimentation par infiltration depuis le fond de la rivière. On peut également avoir le cas en période de crue où le niveau du plan d'eau devient nettement supérieur au niveau de la nappe et envahit une portion de zone non saturée situés de part et d'autre du cours d'eau (zone d'expansion de crue). Ce stockage peut durer de quelques jours à quelques semaines. Après la période de crue, cette eau retourne à la rivière via la nappe.

SIGES Seine-Normandie



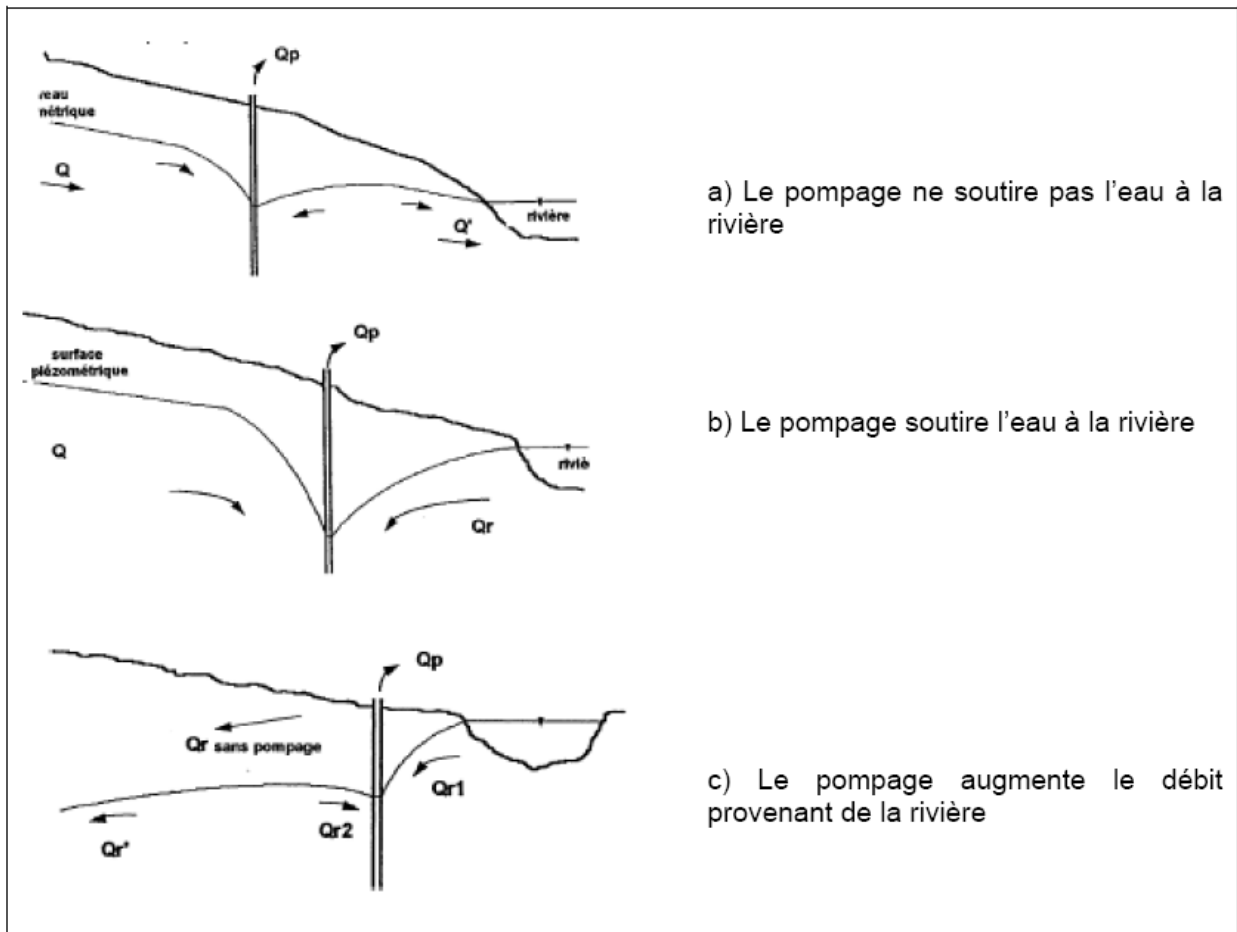


Illustration 9 – Influence d'un pompage sur le flux d'eau entre la nappe et la rivière (Daum et al., 1997 dans Vernoux et al., 2010)

LES RELATIONS QUALITATIVES

Généralement les eaux de surface sont connectées hydrauliquement aux eaux souterraines. Par exemple lorsqu'un aquifère contaminé est drainé par un cours d'eau, il peut résulter une contamination durable des eaux de surface ; à l'inverse les cours d'eau peuvent représenter une source majeure de contaminants pour les aquifères. Cependant la zone à l'interface nappe-rivière est également le siège de processus d'atténuation mis en évidence sur divers sites d'études. Ces phénomènes naturels d'atténuation ont plusieurs atouts, ils permettent l'élimination des particules en suspension, la biodégradation de certains composés, des bactéries, virus et parasites. On peut également noter des effets néfastes pour la qualité de l'eau comme l'augmentation de la minéralisation, des teneurs en ammonium, des teneurs en fer et manganèse ou la formation de sulfures d'hydrogène ou autres composés malodorants du soufre liés aux modifications des conditions d'oxydoréduction (Hiscock et al. 2002 dans Vernoux et al., 2010).

Les interactions entre eaux de surface et eaux souterraines sont difficiles à observer et à caractériser et de fait ont longtemps été ignorées. De plus, ces interactions sont largement contrôlées par des processus naturels mais elles sont également affectées par les activités humaines (pompage, aménagement des cours d'eau, ...).

En période de hautes eaux, ou suite à des pompages importants à proximité de la rivière, le gradient hydraulique peut être dirigé de la rivière vers l'aquifère. Dans ce cas, les substances présentes dans la rivière peuvent voir leurs transferts facilités vers la nappe. L'inverse se produit généralement en période d'étiage

alors que le débit de la rivière est principalement soutenu par les systèmes aquifères. Des substances présentes dans la nappe peuvent alors rejoindre la rivière. La caractérisation de ces flux et de ces sens d'échange peut nécessiter des études préalables, surtout lorsque plusieurs aquifères alimentent en parallèle la rivière.

Il s'avère donc important de prendre en compte la nature des échanges entre la rivière et la nappe, les mécanismes de filtration et les propriétés des contaminants qui régiront les échanges entre la nappe et la rivière. Par exemple, certains composés chimiques sont efficacement filtrés à l'interface nappe-rivière et la mesure d'une faible concentration dans la rivière ne traduira pas nécessairement une concentration faible dans la nappe.

Echanges entre eau de surface et eau souterraine

La chimie d'une eau souterraine et la chimie d'une eau de surface ne peuvent être traitées séparément à partir du moment où les deux systèmes interagissent. Le type d'interface entre la nappe et le cours d'eau (zone hyporhéique) joue alors un rôle très important tant du point de vue des relations quantitatives (berges plus ou moins colmatées ou perméables, fissures ou conduits karstiques) que qualitatives (teneur en matière organique, activité microbiologique, teneur en argile, etc.). C'est dans cette zone que vont se produire différentes réactions biogéochimiques :

- Précipitation / dissolution de minéraux ;
- phénomènes de sorption et d'échanges d'ions : en particulier avec les particules argileuses ;
- réactions d'oxydo-réduction ;
- biodégradation : activité microbiologique en présence de matière organique ;
- volatilisation.

Peu d'auteurs proposent des représentations 3D de cette zone hyporhéique (Illustration 3) et des processus qui l'animent. Il s'agit d'une zone complexe à étudier et à caractériser qui de plus est dynamique avec des variabilités temporelle et spatiale. Il existe également peu de travaux qui relient l'origine géologique et minéralogique des sédiments déposés dans cette zone et les propriétés hydrauliques et biogéochimiques qui en découlent. La synthèse bibliographique de Vernoux et al., 2010 a synthétisé les études décrivant les processus jouant un rôle au sein de ces zones et les facteurs les contrôlant.

Deux paragraphes spécifiques ont été rédigés dans ce rapport (chapite 4.2.2) :

- un premier sur la structure et les propriétés hydrauliques de la zone hyporhéique
- un second sur les méthodes de caractérisation de cette zone.

Les risques de contamination entre la nappe et la rivière

Une pollution du cours d'eau de longue durée peut avoir une incidence directe sur la contamination de la nappe souterraine, notamment après saturation du filtre que constitue la berge. Inversement, un pic de pollution de durée limitée dans le temps, et d'origine anthropique, du cours d'eau (chute d'un camion dans la rivière,...) n'aura souvent que peu d'incidence a priori au niveau de la pollution de la nappe, même lorsque le gradient hydraulique est dirigé de la rivière vers la nappe. Une évolution sinusoïdale de la concentration d'un produit dans la rivière peut dans ce cas se traduire par une quasi absence d'évolution au sein de l'aquifère. Le type de pollution diffuse ou ponctuelle aura donc un impact différent sur les eaux souterraines.

Dans des cas où la vitesse de diffusion de la substance est grande devant la vitesse de drainage de l'aquifère une contamination de la nappe à partir des eaux de surface peut être envisageable en basses eaux. En effet, une contamination de l'aquifère est possible à partir du cours d'eau même lorsque le toit de l'aquifère est supérieur au niveau d'eau dans la rivière (Lin et al., 2005 dans Vernoux et al., 2010).

La contamination d'un aquifère peut être ponctuelle ou diffuse. Dans le premier cas, la contamination est localisée affectant une faible proportion de la masse d'eau (Illustration 9), cependant un impact sur les eaux souterraines et sur les eaux de surface, même à petite échelle, pourra être constaté. Dans le second cas, la pollution affecte de grande surface comme c'est le cas pour les pollutions d'origine agricole (fertilisant ou produits phytosanitaires).

SIGES Seine-Normandie

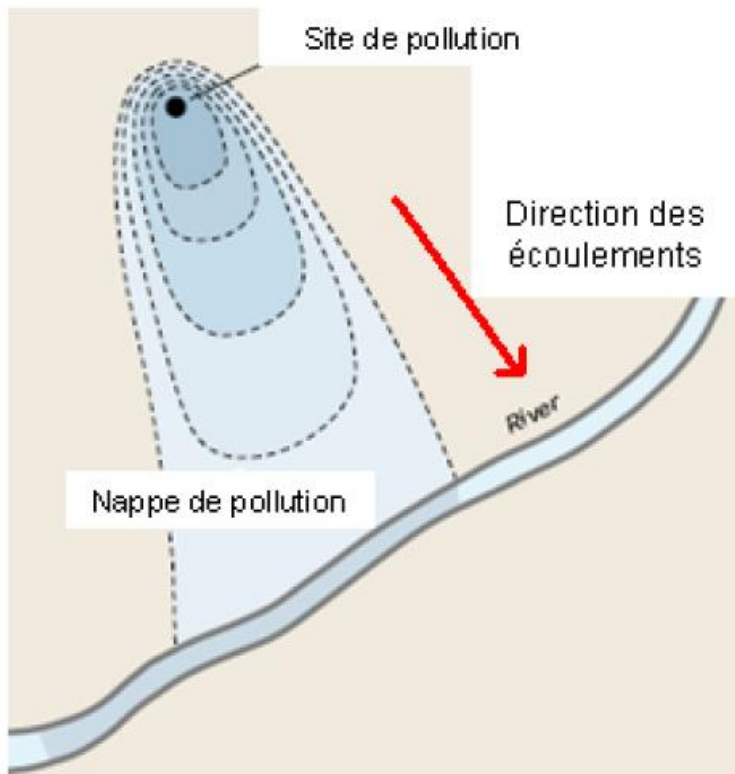


Illustration 10 - Propagation d'une pollution (Winter et al., 1998)

L'épuration des polluants peut se dérouler, soit directement dans la nappe, soit à l'interface entre la nappe et la rivière dans la zone hyporhéique (et dont les caractéristiques peuvent être substantiellement différentes de celles présentes dans la rivière et dans l'aquifère), soit au sein de la rivière.

Tous les polluants ne se comportent pas de la même manière. Il est nécessaire de distinguer plusieurs types des polluants :

- Le polluant se conserve entre la nappe et la rivière mais peut avoir un temps de transfert plus ou moins important.
- La masse de polluant peut être diminuée entre la rivière et l'aquifère. Dans ce cas, soit le contaminant s'est dégradé en substances non toxiques, soit il se transforme en une autre molécule indésirable, soit le contaminant a tout simplement été retenu par la berge. Dans ce dernier cas un changement des conditions physico-chimique peut remettre en circulation le polluant.

Les eaux souterraines ou de surface qui traversent la zone hyporhéique de la rivière peuvent aussi fortement s'enrichir en certains éléments voire leur composition chimique modifiée lors de cette traversée. Ainsi certains polluants peuvent s'accumuler par filtration de l'eau, lorsque celle-ci s'écoule dans un sens, puis être remobilisés par la suite lors d'une inversion de sens des écoulements. En début de période de basses eaux on observe effectivement souvent un pic de polluant : l'inversion du gradient hydraulique provoque un effet de chasse qui remobilise les polluants déposés en période de hautes eaux. La montée des eaux peut aussi, en diminuant le colmatage entre l'aquifère et la rivière conduire à une plus forte perméabilité des berges.

Les informations les plus fiables, que peut nous fournir l'étude de la composition des eaux de surface, sur la composition de la nappe sont données en fin de période de basses eaux et en l'absence de phénomènes pluvieux (sous réserve que la nappe alimente la rivière en période basses eaux). Cependant, il faut également considérer les réactions chimiques qui permettent la rétention ou la dégradation de certains polluants. Inversement, en période de hautes eaux, une éventuelle pollution de la rivière peut entraîner des risques de contamination de l'aquifère. Ce risque est permanent pour certaines parties de la rivière alimentant de façon

continue la nappe.

Les différences de composition au sein de la nappe et de la rivière s'expliquent aussi en partie par le temps de transit qui peuvent être très long dans les aquifères. Une pollution de la surface de l'aquifère peut par exemple mettre des années à affecter la rivière. Ainsi l'étude conduite dans la plaine de la Bassée (Gourcy et al., 2007) a montré que le temps de résidence moyen dans l'aquifère alluvial pouvait atteindre 70 ans.

Il faut donc finalement tenir compte du comportement du polluant à la fois dans le cours d'eau, dans l'aquifère et dans la zone hyporhéique. Et il peut être intéressant d'étudier les temps de transfert des différentes molécules si l'on veut qu'un suivi régulier de la qualité de la rivière nous renseigne sur la qualité de la nappe.

LES RELATIONS ENTRE EAUX SOUTERRAINES ET ECOSYSTEMES TERRESTRES ASSOCIES

Le rapport de Vernoux et al. de 2010 présente également une synthèse concernant les relations entre les eaux souterraines et les écosystèmes terrestres et reprend notamment les résultats du projet BRIDGE (2006) (D10 – impact of hydrogeological conditions on pollutant behaviour in groundwater and related ecosystems. Volume 2 / chapitre 8 – Groundwater / Dependent terrestrial ecosystem Interactions).

D'après la DCE, un écosystème terrestre est dépendant des eaux souterraines s'il est impacté par des modifications des caractéristiques quantitatives ou qualitatives de la masse d'eau souterraine sous l'effet de pressions anthropiques. De fait, de nombreuses masses d'eau souterraine, excepté les masses d'eau captives et certaines présentant des caractéristiques karstiques, sont susceptibles d'impacter les écosystèmes terrestres associés.

Les eaux souterraines peuvent par exemple être indispensables pour maintenir un niveau d'eau à la surface d'une zone humide ou un écoulement d'eau à travers la zone humide et/ou pour maintenir ses caractéristiques physico-chimiques et écologiques.

L'eau alimentant un écosystème terrestre dépendant des eaux souterraines peut être entièrement d'origine souterraine ou seulement à quelques %. Néanmoins une faible contribution peut avoir une importance capitale pour la survie de l'écosystème.

Les écosystèmes terrestres dépendant des eaux souterraines sont souvent classés selon des indicateurs écologiques qui s'avèrent difficiles à définir.

Bibliographie

Vernoux J F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E. (2011) – Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE, rapport BRGM/RP-57044-FR, 207 p., 91 ill., 1 ann.