



9e Session de la Conférence des Parties à la Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971)

*« Les zones humides et l'eau : richesse pour la vie, richesse
pour en vivre »*

Kampala, Ouganda, 8 au 15 novembre 2005

Lignes directrices pour la gestion des eaux souterraines en vue de maintenir les caractéristiques écologiques des zones humides

(Résolution IX.1 Annexe C ii)

Contenu

1. Généralités
2. Introduction
3. Vue d'ensemble des zones humides liées aux eaux souterraines
 - 3.1 Types d'eaux souterraines et zones humides liées aux eaux souterraines
 - 3.2 Liens fonctionnels entre les eaux souterraines et les zones humides
 - 3.3 Qualité des eaux souterraines et zones humides
4. Comprendre les zones humides liées aux eaux souterraines
 - 4.1 Évaluer la connectivité potentielle eaux souterraines-zones humides
 - 4.2 Comprendre les liens hydrologiques entre les zones humides et les eaux souterraines
 - 4.3 Quantifier les mécanismes de transfert d'eau
 - 4.4 Évaluer les connaissances par les bilans hydriques
 - 4.5 Incertitude dans l'évaluation de l'équation du bilan hydrique
 - 4.6 Définir des limites du bilan hydrique
 - 4.7 Choisir l'intervalle de temps pour le bilan hydrique
 - 4.8 Période d'enregistrement
 - 4.9 Prévoir les impacts hydrologiques par la modélisation
5. Vers un cadre pour l'élaboration de stratégies de gestion des eaux souterraines en vue de maintenir les fonctions des zones humides
6. Glossaire
7. Références

Annexe 1 Mécanismes de transfert d'eau dans les zones humides liées aux eaux souterraines

Annexe 2 Relier localisation et mécanismes de transfert d'eau

Annexe 3 Exemple de bilan hydrique

1. Généralités

1. À la 8e Session de la Conférence des Parties contractantes à la Convention de Ramsar (COP8, Espagne, 2002), les Parties ont reconnu la nécessité de mieux comprendre la relation entre zones humides et eaux souterraines. Plus précisément, la Résolution VIII.1 a chargé le Groupe d'évaluation scientifique et technique (GEST) de la Convention « d'étudier le rôle des zones humides du point de vue de la recharge et du stockage des eaux souterraines, le rôle de l'eau souterraine pour le maintien des caractéristiques écologiques des zones humides, ainsi que les impacts du pompage de l'eau souterraine sur les zones

humides ..., y compris, si nécessaire, avec des lignes directrices pour les Parties contractantes sur ces questions.». En outre, l'Action 3.4.5 du Plan stratégique Ramsar 2003-2008 (annexe à la Résolution VIII.25) a demandé au GEST « d'élaborer... des lignes directrices relatives à l'utilisation durable des ressources d'eaux souterraines pour maintenir les fonctions des écosystèmes des zones humides... ». Les Parties présentes à la COP8 ont aussi adopté la Résolution VIII.40 « Orientations relatives à une utilisation des eaux souterraines compatible avec la conservation des zones humides ».

2. Ces demandes de conseils techniques témoignent de ce que le rôle des eaux souterraines dans le maintien des caractéristiques écologiques des zones humides, et celui des zones humides dans la recharge des eaux souterraines sont nettement moins bien compris que le rôle des eaux superficielles. Il est pourtant indispensable que les administrateurs de zones humides et autres personnes concernées comprennent comment la gestion, tant des eaux souterraines que des eaux superficielles, influence une zone humide si la planification de la gestion vise le maintien des caractéristiques écologiques d'une zone humide.
3. Les informations et lignes directrices existantes sur les liens entre les eaux souterraines et les zones humides reposent sur une compréhension conceptuelle aujourd'hui largement dépassée. Bien que ce sujet demeure mal compris, les nouvelles recherches menées ces 20 dernières années pourraient fournir un éclairage technique plus pertinent et plus précis sur :
 - i) le rôle des eaux souterraines dans le maintien des caractéristiques et fonctions d'une zone humide ;
 - ii) le rôle des zones humides dans la recharge et l'évacuation des eaux souterraines ; et
 - iii) la gestion des impacts sur les zones humides des changements d'ordre qualitatif et quantitatif au niveau des eaux souterraines.
4. En particulier, on dispose aujourd'hui de nouvelles connaissances et techniques (telles que l'utilisation avancée de traceurs isotopiques) susceptibles d'améliorer la quantification des liens hydrologiques et écologiques entre les nappes souterraines et les écosystèmes des zones humides associés. Ces questions seront traitées dans les documents techniques proposés par le GEST :
 - i) un document technique détaillé donnant une vue d'ensemble des aspects hydrologiques et écologiques de l'interaction entre les eaux souterraines et les zones humides ; et
 - ii) un document technique détaillé offrant des conseils pratiques pour l'utilisation et la gestion des ressources en eau souterraine/aquifères en vue du maintien des fonctions des écosystèmes.
5. Le présent document fournit des lignes directrices générales pour aider les Parties à assurer la gestion des eaux souterraines en vue du maintien des fonctions des écosystèmes des zones humides. Il vise à orienter les responsables tant de la gestion des ressources en eau (eaux souterraines et eaux superficielles) que de la gestion des zones humides. Il est recommandé de réviser et, si nécessaire, de mettre à jour les présentes lignes directrices une fois que les orientations supplémentaires figurant dans les deux documents techniques proposés auront été préparées.

2. Introduction

L'importance des eaux souterraines

6. Dans nombre de pays, notamment dans les régions arides, l'eau souterraine joue un rôle crucial dans les moyens d'existence et la santé de la majorité des habitants, étant donné qu'elle fournit la quasi totalité des ressources en eau à usage domestique, agricole et industriel.
7. Les processus écosystémiques contribuant au maintien de l'approvisionnement des eaux souterraines doivent être protégés, et restaurés s'ils sont dégradés. Les eaux souterraines entretiennent aussi de nombreux écosystèmes qui fournissent toute une gamme d'avantages/services aux populations humaines. La gestion intégrée des écosystèmes et des ressources naturelles constitue par conséquent un élément essentiel pour la sauvegarde de notre planète.
8. Il existe de par le monde de nombreuses zones humides entretenant des liens étroits avec les eaux souterraines. Par exemple, une zone humide peut dépendre du débit sortant d'un aquifère¹ en tant que source d'eau, ou l'infiltration vers le bas d'eau provenant de la zone humide peut approvisionner un aquifère. Dans de tels cas, l'hydrologie de l'aquifère et la santé de l'écosystème de zone humide sont étroitement liés. Il importe de savoir que cette relation peut être perturbée par des changements à l'échelle de l'aquifère, par exemple pompage d'eau souterraine, ou à l'échelle de la zone humide, par exemple inondation naturelle réduite des zones humides qui recouvrent des aquifères.
9. Il convient par conséquent de gérer les ressources en eau (tant souterraines que superficielles) et les zones humides de façon intégrée afin de garantir la durabilité de l'écosystème et de l'eau qu'il fournit. L'utilisation rationnelle de l'eau et des ressources des zones humides est particulièrement importante dans les zones arides où l'eau constitue souvent un facteur limitatif pour la santé de l'homme et de l'écosystème.
10. Il convient d'évaluer les impacts existants ou potentiels sur la zone humide ou sur l'aquifère, et de les atténuer systématiquement lorsqu'on constate ou prévoit une dégradation importante du système. Ces impacts vont de changements climatiques mondiaux à la gestion locale du niveau d'eau d'une zone humide. Ils peuvent altérer les liens entre les eaux souterraines et une zone humide et, partant, les caractéristiques écologiques de celle-ci. La conservation des zones humides qui alimentent les aquifères est indispensable au maintien des ressources en eau.
11. Les apports d'eau aux zones humides comportent souvent diverses combinaisons d'écoulement superficiel et d'infiltration d'eau souterraine. En conséquence, garantir l'acheminement de l'eau disponible vers une zone humide exigera la gestion intégrée des ressources en eau souterraine et superficielle associées. Cette gestion exigera à son tour une compréhension quantitative rationnelle de l'origine (superficielle et/ou subsuperficielle), de la trajectoire et de la variabilité des entrées et sorties d'eau d'une zone humide, afin de pouvoir élaborer des stratégies d'exploitation de l'eau susceptibles de réduire au minimum

¹ Aquifère : formation géologique suffisamment perméable pour emmagasiner l'eau, permettre son évacuation et alimenter des puits, des sources et des zones humides.

ou de prévenir des changements inacceptables dans les caractéristiques écologiques de la zone humide.

12. Nombre d'aquifères sont actuellement largement exploités, voire surexploités pour l'eau (Custodio 2002), notamment au Mexique, en Chine, au Moyen-Orient et en Espagne (Morris *et al.* 2003). Dans certains cas, cette exploitation à l'évidence non durable a entraîné une altération du régime hydrologique des zones humides associées à des aquifères, et a sérieusement modifié leurs caractéristiques écologiques – par exemple dans les zones humides d'Azraq, en Jordanie (Fariz & Hatough-Bouran 1998) et de Las Tablas de Daimiel, en Espagne (Fornés & Llamas 2001).
13. Dans d'autres cas, par exemple en Australie-Occidentale, l'élévation du niveau des eaux souterraines due à l'abattage des eucalyptus qui contribuaient à l'évaporation de grandes quantités d'eau, a entraîné la salinisation des sols et la dégradation consécutive de zones humides et autres écosystèmes.
14. À l'instar des autres types de zones humides, la gestion des zones humides liées à des eaux souterraines doit être associée étroitement à la gestion des ressources en eau. Le cours d'eau ou le bassin hydrographique constitue l'unité de gestion fondamentale pour les cours d'eau et autres régimes des eaux de surface. Cependant, lorsque les eaux souterraines dominent le régime hydrologique, l'unité de gestion la plus appropriée sera l'unité aquifère, surtout si les limites de l'aquifère ne coïncident pas avec les limites superficielles du bassin hydrographique.

Objectif des présentes lignes directrices

15. Ce document offre un cadre général pour aider les Parties contractantes à comprendre l'interaction entre les zones humides et les eaux souterraines, et ainsi, à élaborer des stratégies d'étude d'impact et de gestion durable des eaux souterraines susceptibles de garantir le maintien des caractéristiques écologiques d'une zone humide. Il se concentre avant tout sur les questions liées à la quantité d'eau et n'entre pas dans les détails des questions de qualité de l'eau.
16. Le contenu du présent document est le suivant :
 - une vue d'ensemble des zones humides liées aux eaux souterraines et des liens existants entre les eaux souterraines et les écosystèmes des zones humides,
 - une section plus détaillée sur la caractérisation, la compréhension et la quantification des liens entre les eaux souterraines et les zones humides à l'échelle des sites,
 - des orientations générales sur l'élaboration de stratégies pour la gestion intégrée des ressources des eaux souterraines et des zones humides associées, en vue de contribuer au maintien des fonctions des écosystèmes des zones humides,
 - des remarques finales et des recommandations.
17. Étant donné la complexité de ces sujets, certaines parties des lignes directrices ont un contenu technique destiné aux lecteurs possédant déjà une certaine connaissance de l'hydrologie des eaux souterraines. Un glossaire des termes utilisés est fourni pour aider les non-spécialistes.

18. Ces lignes directrices seront lues dans le contexte du Cadre intégré pour les orientations de la Convention de Ramsar relatives à l'eau (Résolution IX.1 Annexe C), en se référant à d'autres orientations Ramsar en rapport avec la détermination et la mise en œuvre des attributions d'eau nécessaires au maintien des fonctions écologiques des zones humides (Résolution VIII.1 ; Manuel Ramsar 12 sur l'utilisation rationnelle, « Attribution et gestion de l'eau »), à la Résolution IX.1 Annexe C i « *Gestion des bassins hydrographiques: orientations additionnelles et cadre pour l'analyse des études de cas* » et aux *Rapport techniques Ramsar* sur la détermination et la satisfaction des besoins écologiques en eau des zones humides.

3. Vue d'ensemble des zones humides liées aux eaux souterraines

3.1 Types d'eaux souterraines et de zones humides liées aux eaux souterraines

L'eau souterraine est l'eau contenue dans les roches perméables, telles que le calcaire, et les sédiments non consolidés, tels que le sable et les graviers.

19. Le niveau de l'eau souterraine, au-dessous duquel les roches ou sédiments sont saturés, est appelé nappe phréatique (figure 1). On trouve aussi de l'eau au-dessus de la nappe phréatique, dans la zone non saturée, par exemple sous forme d'eau du sol, mais cette eau n'est normalement pas exploitée par l'homme et on ne l'appelle généralement pas eau souterraine. En conséquence, l'eau emmagasinée dans les sols des zones humides est appelée eau souterraine si le sol est saturé quasi en permanence.
20. Toute roche, tout sédiment, tout sol peut emmagasiner de l'eau et permettre son évacuation, mais la vitesse des mouvements d'eau est lente (souvent quelques mètres par an seulement - m an^{-1}) en comparaison avec le débit des cours d'eau (normalement en mètre par seconde - m s^{-1}). Cela se traduit par une réponse plus lente des eaux souterraines à la recharge ou à l'exploitation.
21. Les mouvements d'eau dans les roches et les sédiments peuvent varier sur plusieurs ordres de grandeur. On distingue trois types principaux de roches et sédiments :
- i) ceux qui ont des gros pores (vides) ou fissures (fentes) – on les appelle aquifères et ils comprennent la craie, le calcaire, le grès et le gravier ;
 - ii) ceux qui contiennent de petites quantités d'eau et permettent à l'eau de s'écouler lentement – on les appelle aquitards et ils incluent les mudstones grossiers ;
 - iii) ceux qui contiennent très peu d'eau et arrêtent les mouvements de l'eau souterraine – on les appelle aquicludes et ils incluent de l'argile et du granit non fracturé.

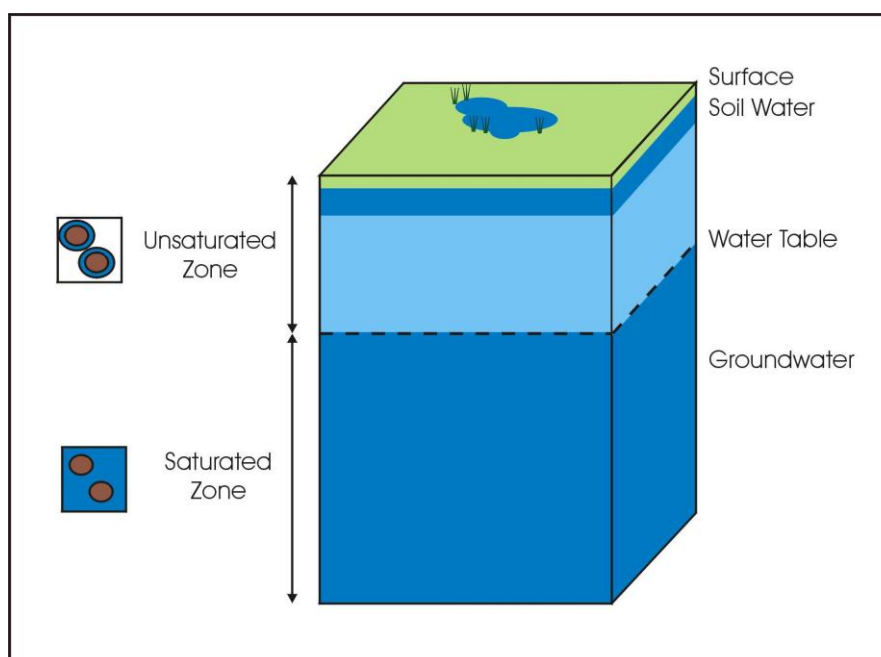


Figure 1. Définition des eaux souterraines

Zone non saturée
Zone saturée

Eaux superficielles du sol
Nappe phréatique
Eaux souterraines

22. Toutefois, lorsqu'il n'y a pas d'aquifère très perméable (p. ex., craie ou calcaire), l'eau est parfois exploitée commercialement dans les roches peu perméables (p. ex. granits fracturés en Afrique), et il arrive alors qu'on les appelle aussi aquifères.
23. Les sources superficielles provenant d'aquifères sont les sources d'eau apparentes de nombreux cours d'eau et autres types de zones humides. La base d'une zone humide, par exemple le lit d'un cours d'eau, peut être en contact avec un aquifère et invisible. Pratiquement tous les types de zones humides Ramsar, y compris les lagons côtiers, peuvent avoir des échanges d'eau importants avec les aquifères. Toutefois, certains types sont plus susceptibles d'être étroitement liés aux eaux souterraines – il s'agit notamment des zones humides souterraines (dans les réseaux de grottes), des sources d'eau douce, et des oasis du désert. En revanche, les tourbières-couverture situées au sommet de collines, les sites de traitement des eaux usées, et les réservoirs ont peu de chances d'être étroitement associés à des eaux souterraines.
24. La nature précise des interactions entre les eaux souterraines et les zones humides dépendra des conditions géologiques locales. Le fait qu'un aquifère figure sur une carte géologique ne signifie par pour autant que les zones humides situées au-dessus seront nécessairement alimentées par des eaux souterraines ou seront en mesure de recharger l'aquifère. L'ampleur de l'interaction dépend de la perméabilité de toute roche ou sédiment qui se trouve entre la zone humide et l'aquifère.
25. Lorsque des roches imperméables (aquiclude) recouvrent un aquifère, l'eau ne peut pas se déplacer verticalement (vers le haut ou vers le bas) ; on parle alors d'aquifère « confiné » (figure 2). Dans de tels cas, la zone humide et l'aquifère sont hydrologiquement séparés et il

n'y a pas d'échange d'eau. Lorsque des roches ou sédiments peu perméables (aquitard) recouvrent l'aquifère, il peut y avoir une interaction, mais les mouvements d'eau seront lents et les quantités d'eau limitées. Lorsqu'il n'y a pas de roches sus-jacentes peu perméables (ni aquitard, ni aquiclude), l'aquifère est dit « non confiné » ; dans ce cas, la zone humide et l'aquifère sont en contact direct et le degré d'interaction peut être élevé.

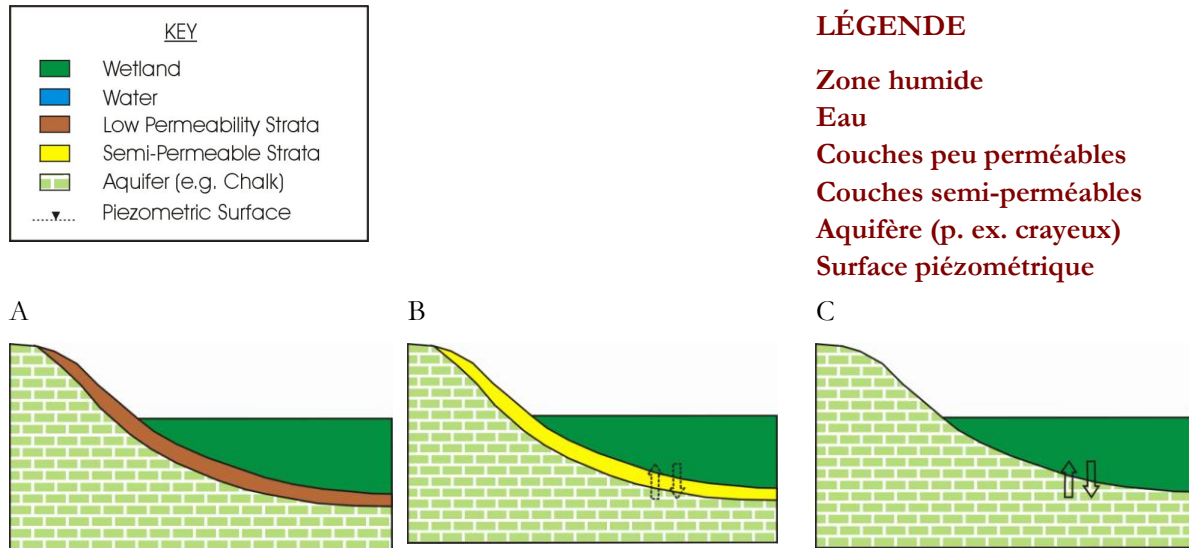


Figure 2. Différents types d'aquifère. A) aquifère et zone humide séparés par des roches imperméables (aquiclude) – pas d'interaction ; B) aquifère et zone humide séparés par des roches peu perméables (aquitard) – interaction réduite ; et C) aquifère et zone humide séparés par des roches très perméables ou non séparés – forte interaction (voir légende figure 3).

26. L'interaction entre l'eau souterraine et les zones humides peut varier à l'intérieur des zones humides (p. ex., le long du cours d'un fleuve) et entre des zones humides individuelles, même celles qui sont rapprochées. Par exemple, les trois Breckland Meres (petits lacs) à l'est de l'Angleterre - Langmere, Ringmere et Fenmere, se ressemblent physiquement et sont géographiquement proches les uns des autres (figure 3). Langmere est en contact hydrologique direct avec l'aquifère crayeux sous-jacent et son régime hydrologique est tributaire des fluctuations des eaux souterraines. Ringmere est légèrement séparé du même aquifère par un revêtement de matières organiques (aquitard) mais reste largement tributaire des eaux souterraines. En revanche, Fenmere est isolé de l'aquifère crayeux par une couche d'argile (aquiclude) et son niveau d'eau dépend exclusivement des précipitations et de l'évaporation.

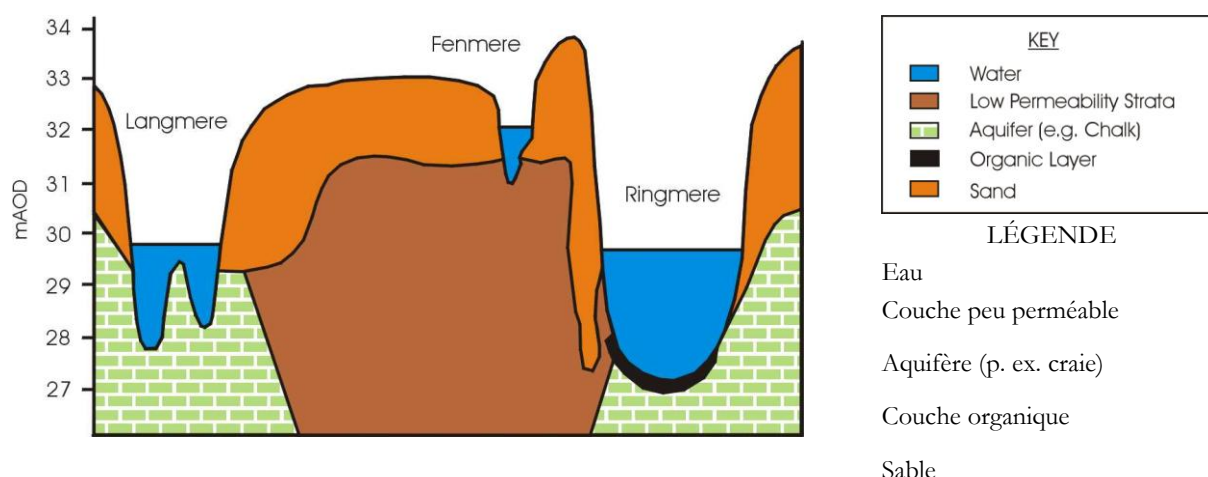
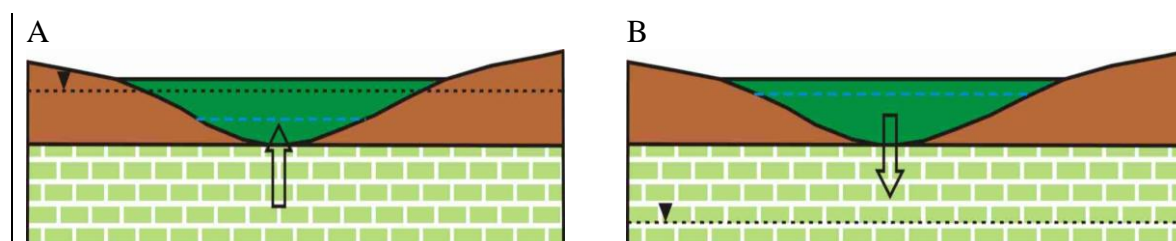


Figure 3. Coupe transversale géologique, Breckland Meres, R.-U.

3.2 Liens fonctionnels entre les eaux souterraines et les zones humides

27. Le mouvement d'eau entre les aquifères et les zones humides peut être exprimé comme l'une des deux principales fonctions hydrologiques, selon la direction du mouvement de l'eau. Le courant d'eau ascendant, de l'aquifère vers la zone humide, est appelé évacuation des eaux souterraines et le courant descendant, de la zone humide vers l'aquifère, est appelé recharge des eaux souterraines (figure 4).
28. L'évacuation a lieu lorsque le niveau des eaux souterraines (ou la hauteur piézométrique²) se trouve au-dessus du niveau d'eau de la zone humide. Il y a recharge lorsque le niveau d'eau de la zone humide est supérieur à celui des eaux souterraines. Ainsi, les liens fonctionnels entre les eaux souterraines et les zones humides dépendent de la géologie (p. ex. la présence d'un aquiclude ou aquitard) et du niveau d'eau relatif de la zone humide et de l'aquifère.
29. L'interaction peut aussi varier dans le temps et l'espace, aussi est-il toujours nécessaire de procéder à des études spécifiques aux sites pour déterminer et confirmer les interactions locales. Le niveau des eaux souterraines varie naturellement dans le temps en fonction de la pluviosité. En outre, la gestion du niveau d'eau, dans la zone humide ou l'aquifère, notamment par l'exploitation, peut altérer le niveau relatif de l'eau. Ces deux facteurs peuvent modifier la relation fonctionnelle, comme le montrent les trois exemples ci-après :



² Gradient hydraulique (syn. gradient piézométrique, charge hydraulique) : niveau que les eaux souterraines atteindraient si elles n'étaient pas limitées par une couche peu perméable située au-dessus de l'aquifère (aquiclude ou aquitard) ou épuisées, par exemple par l'évaporation ou le pompage.

Figure 4. Évacuation et recharge des eaux souterraines. A) écoulement des eaux souterraines – lorsque le niveau de la nappe phréatique est situé au-dessus de celui de la zone humide ; et B) recharge des eaux souterraines – lorsque le niveau d'eau de la zone humide est situé au-dessus de celui de la nappe phréatique (voir figure 2 pour la légende).

- i) Dans le *bassin d'Azraq en Jordanie*, les *zones humides de l'oasis d'Azraq* (site Ramsar) sont surtout alimentées par les remontées d'eau souterraine, à savoir l'évacuation de l'aquifère (Fariz & Hatough-Bouran 1998). Le pompage de la nappe phréatique pour alimenter Amman, la capitale, a entraîné un abaissement du niveau de la nappe phréatique, ce qui a réduit l'évacuation d'eau vers les zones humides et entraîné un changement dans les caractéristiques écologiques de ces zones.
 - ii) Dans le *bassin de l'Hadejia-Jamare, au Nigeria*, l'inondation naturelle des zones humides de la plaine d'inondation d'Hadejia-Nguru permet la recharge de la nappe souterraine grâce au mouvement descendant de l'eau vers l'aquifère sous-jacent, qui fournit des ressources en eau aux populations qui vivent en dehors de la plaine d'inondation (Thompson & Hollis 1995). La baisse du débit des cours d'eau, imputable à la retenue de l'eau dans les barrages situés en amont, a réduit l'inondation naturelle des zones humides, ce qui a entraîné une diminution de la recharge de l'aquifère.
 - iii) La *zone humide de Las Tablas de Daimiel, au centre de l'Espagne*, est alimentée par le haut Guadiana et par l'évacuation de l'aquifère de La Mancha lorsque le niveau des eaux souterraines est élevé ; mais lorsque ce dernier est faible, la direction du flux des eaux souterraines s'inverse et l'eau se déplace vers le bas à partir de la zone humide, pour recharger l'aquifère (Llamas, 1989). Jusque dans les années 1970, la relation fonctionnelle prédominante était l'évacuation (figure 5a). Toutefois, la faible pluviosité conjuguée au pompage de l'aquifère pour l'agriculture irriguée a entraîné un abaissement du niveau de la nappe phréatique, de telle sorte que la recharge de l'aquifère a dominé durant les années 1990 (figure 5b). Cette situation a entraîné un grave assèchement de la zone humide. Ces dernières années il a été décidé, à titre de mesure d'urgence, de transférer de l'eau du bassin hydrographique du Tage vers la zone humide de Las Tablas de Daimiel. Toutefois, étant donné que l'eau du Tage possède des caractéristiques différentes, ce transfert entraîne des changements physiochimiques et écologiques dans la zone humide (Cirujano *et al.* 1996).
30. Dans de nombreuses zones humides, le niveau d'eau dépend d'une combinaison de facteurs - précipitations directes, ruissellement de surface et évacuation / recharge des eaux souterraines. L'eau souterraine devient souvent un facteur plus important à la saison sèche et peut constituer la seule source d'eau d'une zone humide. Ainsi, des apports d'eau souterraine, même insignifiants, peuvent être essentiels pour le maintien des caractéristiques écologiques d'une zone humide.
 31. De plus, dans les régions du monde à très faibles précipitations, telles que le bassin hydrographique du Tempisque, au Costa Rica, il arrive que l'eau souterraine soit la seule source d'eau d'une zone humide : la recharge de l'aquifère se fait peut-être à plusieurs kilomètres de là, par exemple dans des zones montagneuses, où le climat est plus humide.

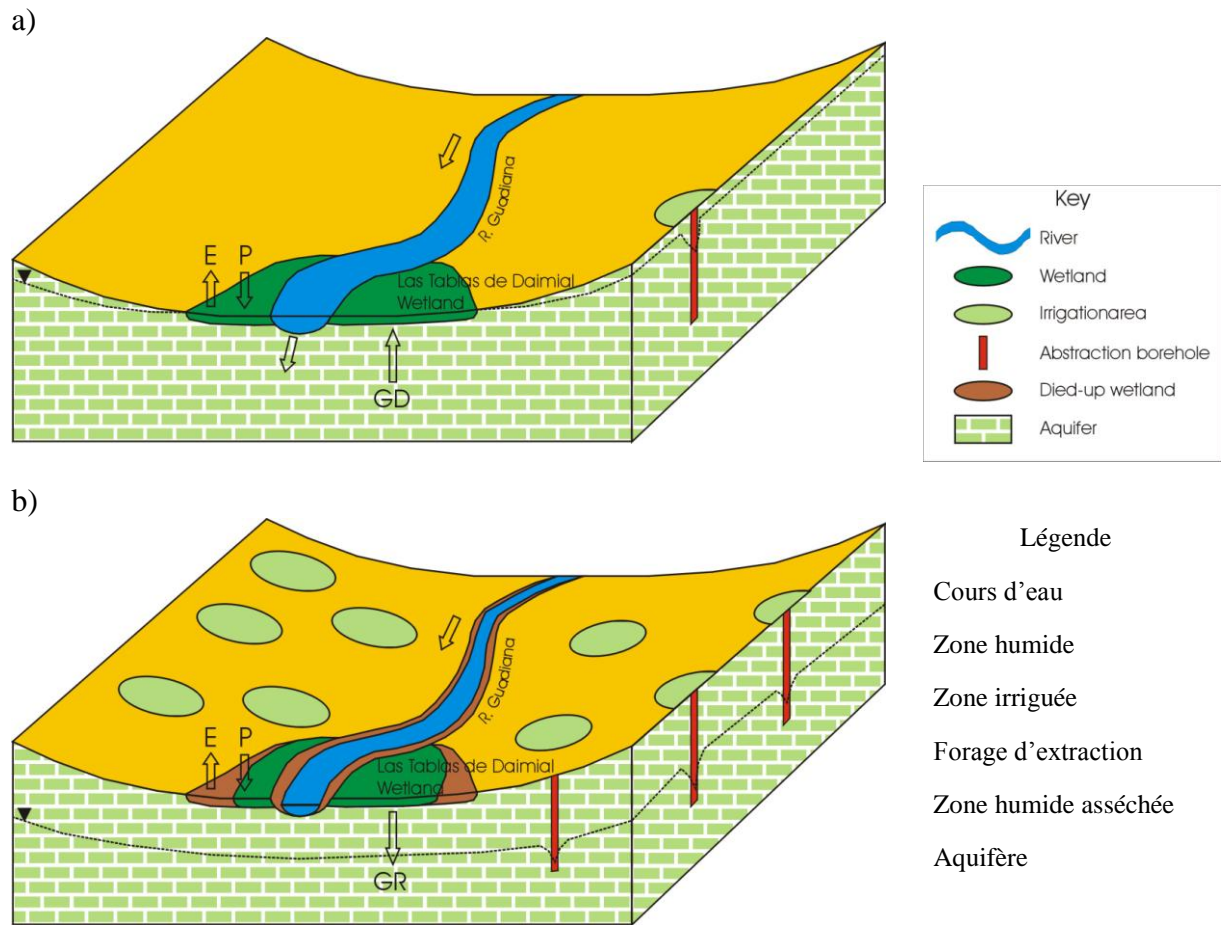


Figure 5 Schéma fonctionnel montrant le cours supérieur du Guadiana et la zone humide de Las Tablas de Daimiel : a) dans les années 1960, avec une faible exploitation des eaux souterraines, un niveau élevé de la nappe phréatique et une évacuation des eaux souterraines vers la zone humide ; et b) dans les années 1990, avec de faibles précipitations, une exploitation considérable des eaux souterraines, un niveau peu élevé de la nappe phréatique, une superficie réduite de la zone humide et une recharge en eaux souterraines de la zone humide vers l'aquifère.

32. Les systèmes hydrologiques karstiques et de grottes souterrains ont été ajoutés au Système de classification des types de zones humides dans la Résolution VI.5, Brisbane, 1996. Ces zones humides souterraines sont intimement liées aux eaux souterraines.
33. *Le site Ramsar de Škocjanske jame (grottes de Škocjan), en Slovénie* (figure 6), offre un excellent exemple de lien entre des zones humides souterraines et des eaux souterraines. Ce système se trouve dans la région de Kras (*c'est-à-dire du karst*), qui a donné son nom au phénomène karstique dans le monde entier. Le site de Škocjan, exceptionnel de par ses dimensions, présente trois caractéristiques hydrologiques dominantes :
 - i) des eaux qui se déplacent comme un cours d'eau souterrain alimenté par l'eau de pluie ;
 - ii) des réservoirs d'eau stagnante dans le réseau de grottes ; et

- iii) une fluctuation importante du niveau des eaux souterraines, dépassant 130 mètres dans les parties du réseau de grottes qui ont été étudiées.
34. La compréhension des processus hydrologiques des grottes de Skocjan a apporté des connaissances génériques sur les phénomènes hydrologiques des zones karstiques. Le bassin hydrographique du réseau de grottes couvre 337 km². Le débit de surface de la Reka oscille entre 0,12 et 400 m³s⁻¹, avec une moyenne de 8,32 m³s⁻¹. Après s'être enfoncée dans les grottes de Skocjan, l'eau coule sous terre sur quelque 41 km et resurgit en Italie, sous le nom de Timavo. À l'intérieur des grottes de Skocjan, la Reka peut être suivie sous terre sur 2,4 km, passant de 317 à 214 mètres au-dessus du niveau de la mer au siphon terminal ou puisard. À quelque 900 m au nord-ouest, à Kačja jama (grottes de Kačja), la Reka coule dans des galeries à 182 m (le siphon d'entrée est situé à 204 m) et disparaît dans le siphon final, à 156 m au-dessus du niveau de la mer.

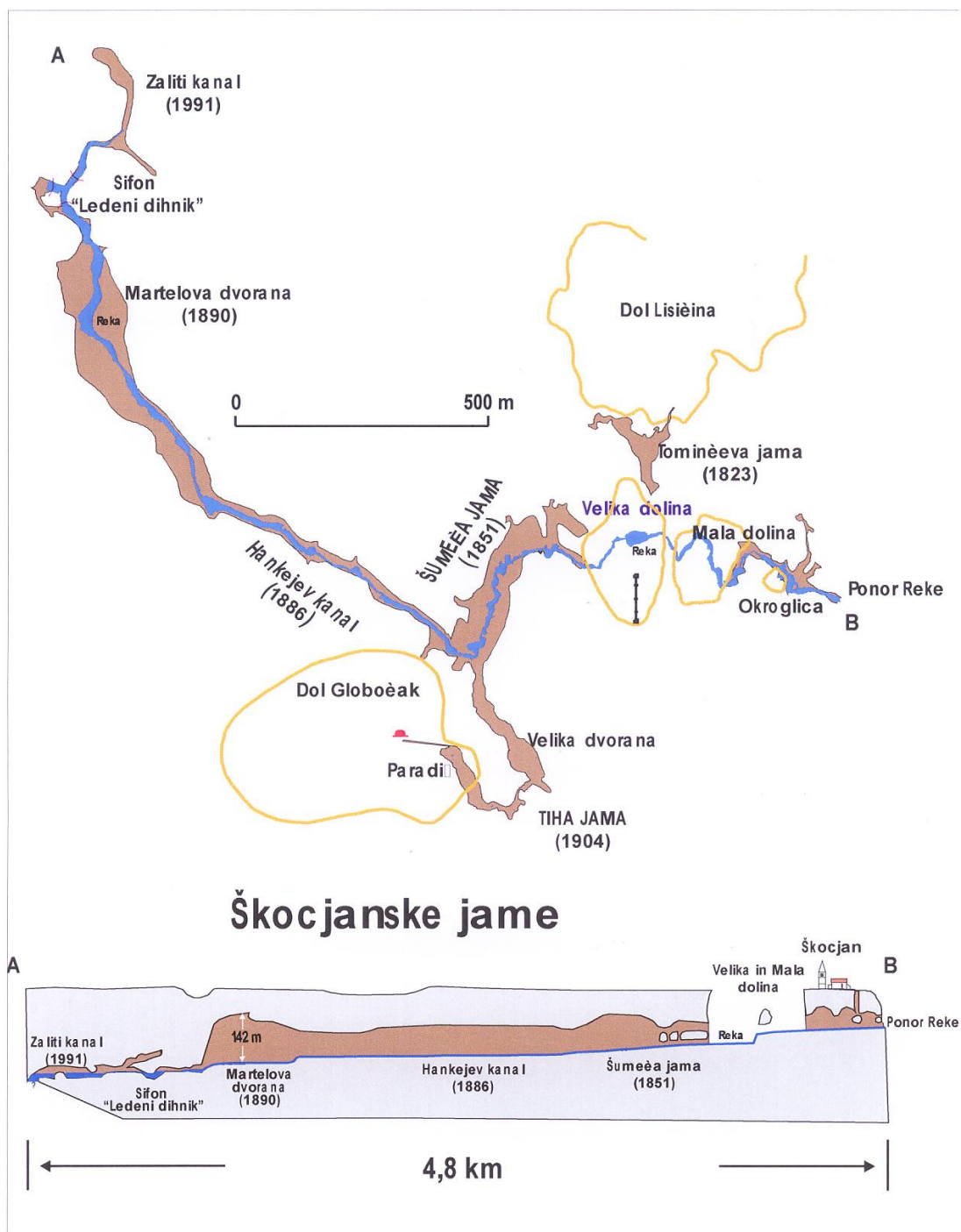


Figure 6. Le système du site Ramsar de Škocjanske jame (grottes de Skocjan), en Slovénie

35. La principale valeur hydrologique de ce système de zone humide est sa capacité de stocker de l'eau : ses eaux sont utilisées en Italie pour l'approvisionnement urbain. Les valeurs hydrogéologiques, hydrogéomorphologiques et hydrologiques (y compris les avantages/services) peuvent se résumer de la manière suivante :

- drainage des eaux karstiques et des eaux de surface du bassin hydrographique ;

- formation d'éléments karstiques souterrains caractéristiques ;
- ponors karstiques (syn. embut, estavelle, ponoir) et sources ;
- stockage de l'eau ; et
- approvisionnement en eau potable pour les zones urbaines (p. ex., Trieste et son agglomération).

3.3 Qualité des eaux souterraines et zones humides

36. À mesure que l'eau coule à travers un aquifère, elle dissout des minéraux contenus dans la roche, tels que calcium, sodium, bicarbonate et chlorure, et la température devient égale à celle des roches. Il en résulte que les propriétés chimiques et thermales des eaux souterraines sont souvent très différentes de celles des eaux de surface. Ainsi, les zones humides alimentées par des eaux souterraines possèdent-elles souvent des communautés floristiques et faunistiques différentes de celles qui sont alimentées uniquement par des eaux de surface. Dans certains cas, la présence ou l'absence d'espèces particulières connues pour dépendre des eaux souterraines peut être un indicateur de la dépendance (élevée ou réduite) d'une zone humide par rapport aux eaux souterraines.
37. En outre, bien que les eaux souterraines puissent, en terme de volume, être une source d'eau mineure pour les zones humides, même de petites quantités d'eau souterraine peuvent avoir un impact considérable sur la qualité de l'eau et, partant, sur les processus écologiques et les organismes vivants de la zone humide. Par exemple, à Wicken Fen, en Angleterre, les changements des caractéristiques écologiques ont d'abord été attribués à l'assèchement progressif de la zone humide. Toutefois, une analyse hydrologique a révélé que des activités de gestion des crues avaient réduit les crues du cours d'eau à forte alcalinité, alimenté par les eaux souterraines, ce qui avait altéré l'acidité de la zone humide.

4. Comprendre les zones humides liées aux eaux souterraines

4.1 Évaluer la connectivité potentielle eaux souterraines - zones humides

38. De nombreuses zones humides sont reliées, sur les plans hydrologique et écologique aux nappes d'eau souterraine adjacentes, mais le degré d'interaction peut être très variable. Certaines zones humides seront totalement dépendantes de l'évacuation des eaux souterraines, quelles que soient les conditions climatiques, alors que d'autres auront une dépendance très limitée, par exemple uniquement lors des périodes de sécheresse – et d'autres encore n'auront absolument aucun lien avec les eaux souterraines. Certains aquifères dépendent presque entièrement de la recharge par les zones humides, par exemple, l'aquifère de Kuiseb, en Namibie, d'autres, pas du tout.
39. Il est indispensable que les administrateurs de zones humides et les organismes concernés par la protection et maintien des caractéristiques écologiques des zones humides soient en mesure d'influencer les plans et stratégies de gestion des eaux souterraines et d'y contribuer. Toutefois, il importe également de déterminer l'apport technique que les administrateurs de zones humides doivent fournir à la gestion des ressources en eau. Dans certains cas, l'interaction zones humides-eaux souterraines est très limitée, voire inexistante, et l'exploitation des eaux souterraines des aquifères locaux n'a qu'un impact limité, voire inexistant, sur les zones humides. Dans d'autres cas, l'exploitation des eaux souterraines d'un aquifère profond aura lieu à bonne distance de la zone humide et aura néanmoins des

impacts imprévisibles non négligeables sur l'hydrologie et, en conséquence, sur les caractéristiques écologiques de cette zone.

40. Les gestionnaires tant des zones humides que des ressources en eau souterraine effectueront un examen préalable à l'échelle d'un bassin hydrologique ou d'un aquifère régional, pour évaluer la possibilité d'interaction entre zones humides et eaux souterraines. Le degré de connectivité sera largement déterminé par une combinaison de facteurs liés à la géologie, à l'hydrologie régionale et à la topographie.
41. Un examen préalable au niveau du bassin hydrographique ou de la région, effectué par une équipe de spécialistes ayant des connaissances en géologie, hydrologie et écologie, devrait permettre aux gestionnaires des zones humides et des ressources en eau d'identifier les sites les plus susceptibles d'abriter des zones humides plus ou moins dépendantes des eaux souterraines. Un tel examen devrait aussi permettre de recenser les sites où des études plus détaillées ou des évaluations de terrain pourraient se révéler nécessaires afin de garantir la prise en compte systématique des besoins en eau souterraine des zones humides dans les plans de gestion des eaux souterraines.
42. Habituellement, ce type d'examen préalable se prête à l'utilisation d'un SIG, éventuellement complété par des outils de télédétection. On obtient ainsi une indication du risque potentiel de captage régional des eaux souterraines ou d'autres formes d'exploitation, telle que la recharge artificielle à partir des eaux usées, auxquels sont exposées les zones humides. L'essentiel de l'analyse peut être théorique même si, à ce niveau de résolution, elle ne peut au mieux que donner des « signaux d'alarme » sur l'emplacement des zones à haut risque, où une exploitation à grande échelle des eaux souterraines ne saurait être envisagée sans procéder à des études d'impact supplémentaires pour les zones humides de la région. Les études théoriques exigent des cartes de la géologie, de l'occupation des sols et de la végétation, ainsi que des données précises sur les propriétés de l'aquifère et l'utilisation des eaux souterraines, normalement disponibles auprès des ministères chargés des ressources en eau. Les études supplémentaires devraient alors inclure des études portant sur des zones humides particulières, comme l'expliquent les sections suivantes.

4.2 Comprendre les liens hydrologiques entre les zones humides et les eaux souterraines

43. Une condition préalable à l'évaluation des implications, pour une zone humide, de tout impact hydrologique externe consiste à comprendre par quels moyens l'eau entre dans la zone humide et en ressort (ce que l'on appelle les mécanismes de transfert d'eau), et à quantifier les vitesses correspondantes des mouvements d'eau.
44. La plupart des administrateurs de zones humides connaissent bien l'analyse géographique (horizontale) des zones humides, à l'aide de cartes de plans d'eau ouverts et de zonage de la végétation. Toutefois, comprendre les interactions avec les eaux souterraines exige une vision géologique dans une troisième dimension, notamment en observant des coupes verticales à travers le sol et les roches situés sous la zone humide. L'annexe 1 donne des détails sur les 14 différents types de mécanismes de transfert d'eau, décrits schématiquement sous forme de coupes verticales. Il en ressort que les eaux souterraines peuvent pénétrer dans une zone humide directement à partir d'une source (débit de la source), par un mouvement latéral à partir de l'aquifère adjacent (infiltration), ou par un mouvement ascendant à partir de l'aquifère sous-jacent (évacuation). L'eau se déplace

généralement d'une zone humide vers un aquifère par un mouvement descendant (recharge).

45. Pour comprendre l'hydrologie d'une zone humide, il faut avant tout définir quels mécanismes de transfert d'eau y sont présents et lesquels sont les plus importants. Déterminer si le mouvement des eaux souterraines vers ou à partir d'une zone humide est un mécanisme important dépend non seulement de la présence d'un aquifère, mais aussi de la nature des sols et des roches se trouvant entre l'aquifère et la zone humide. Si la zone humide est en contact direct avec l'aquifère, l'échange d'eau est très probable. Mais s'il y a une couche peu perméable (aquitard ou aquiclude) entre la zone humide et l'aquifère sous-jacent, il y aura probablement peu d'échange d'eau souterraine, voire aucun.
46. Pour aider l'utilisateur à identifier les mécanismes de transfert d'eau, Acreman (2004) a mis au point une typologie hydrologique des zones humides, reposant sur la localisation du paysage. Cette méthode, décrite à l'annexe 2, vient compléter d'autres systèmes de classification tels que celui des tourbières à couverture végétale (« mires ») (Steiner 1992).
47. Il est important de se rappeler que la zone humide à l'étude a peu de chance d'être parfaitement identique à l'un des types de zone humide présentés : de nombreuses zones humides peuvent présenter les caractéristiques de plus d'un type. Néanmoins, la typologie donne une indication des situations les plus courantes.
48. Le résultat de l'étude hydrologique devrait être une coupe transversale de la zone humide étudiée, montrant les mécanismes de transfert d'eau (voir annexe 1), ainsi que les sols et les roches sous-jacents à la zone humide. Les zones humides réelles sont souvent complexes, présentant plusieurs mécanismes de transfert d'eau simultanément, même si certains de ces mécanismes peuvent dominer dans différentes parties d'une zone humide individuelle.
49. La figure 7 présente une coupe transversale d'une zone humide hypothétique, dans laquelle différents mécanismes de transfert d'eau dominent dans différentes parties de la zone humide. Dans la Zone A, les flux entrants sont dominés par l'eau provenant de sources (S), et les flux sortants par le pompage (PU), alors que dans la Zone B, c'est le débordement du cours d'eau (OB) qui domine. La Zone C est un pôle d'échange avec les eaux souterraines (GD, GR), tandis que l'hydrologie de la Zone D est dominée par les précipitations (P) et par l'évaporation (E). Dans la Zone E, les apports viennent de l'infiltration des eaux souterraines (GS) et du ruissellement des pentes adjacentes (R). Il faudra probablement effectuer des coupes transversales pour différentes périodes (tout particulièrement pour la saison humide ou sèche), car le mécanisme de transfert d'eau peut changer : par exemple, l'interaction entre l'aquifère et la zone humide peut altérer l'évacuation et la recharge à mesure que le niveau de la nappe phréatique change.

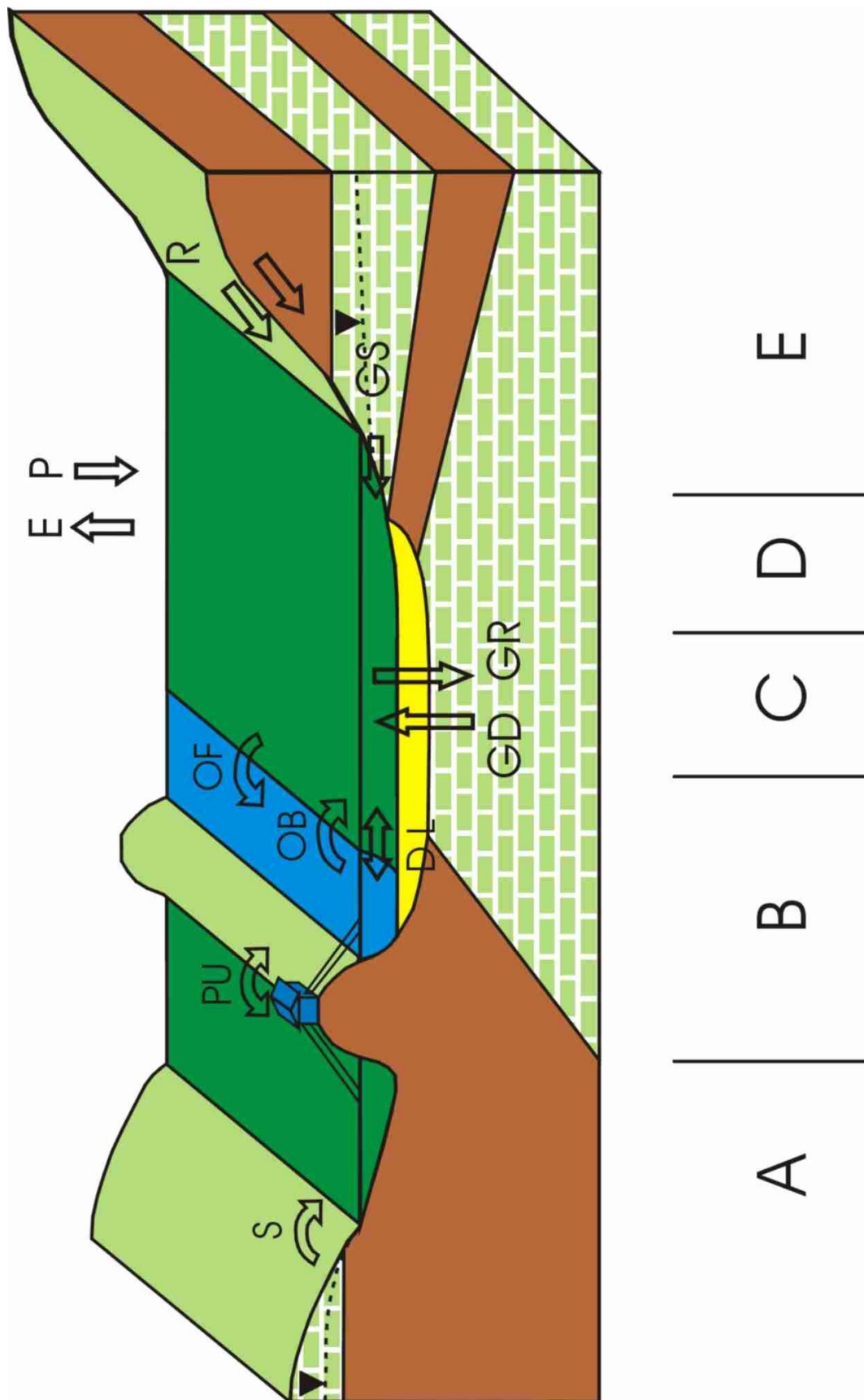


Figure 7. Schéma fonctionnel d'une zone humide hypothétique, montrant les mécanismes de transfert d'eau à différents endroits.

4.3 Quantifier les mécanismes de transfert d'eau

50. Parce que les aquifères ne sont pas visibles, il est très difficile de mesurer précisément la nature et l'ampleur de toute interaction des eaux souterraines avec les zones humides. Il existe toutefois divers moyens de récolter des informations à cet égard. L'intensité et la portée des activités de collecte d'information dépendront de la confiance dans les résultats et du niveau de quantification requis.
51. Une étude d'identification de la possibilité (présence/absence) de connectivité significative entre une zone humide et les masses d'eau souterraine associées peut n'exiger qu'une évaluation préliminaire (voir Section 4.1). Toutefois, déterminer le rendement durable et l'autorisation d'exploiter un aquifère risque d'exiger des études pratiques approfondies par des spécialistes et une surveillance continue.
52. En général, trois niveaux d'évaluation peuvent aider à comprendre et à quantifier les mécanismes de transfert d'eau :
 - i) **Informations documentaires.** L'étude débute normalement par les informations disponibles. Parmi les données spatiales figureront souvent des cartes topographiques, d'occupation des sols/de la végétation, et géologiques, ainsi que des photographies aériennes ou images satellite. Les vieilles photos se sont révélées très utiles pour expliquer les liens hydrologiques avec les zones humides au Costa Rica, où les pratiques de restauration bénéficient d'un savoir historique. Les cartes géologiques peuvent révéler la proximité d'aquifères par rapport à des zones humides. Toutefois, ces cartes sont généralement réalisées en extrapolant des informations tirées de données géologiques limitées (telles que carottes) – ainsi, dans certaines parties de ces cartes, la présence et l'épaisseur de couches imperméables entre une zone humide et un aquifère peuvent être très incertaines. Qui plus est, la perméabilité (ou conductivité hydraulique) des couches ne sera pas évidente sur la carte.
 - ii) **Visites de terrain.** Des visites devraient être entreprises sur le terrain à un stade précoce de toute étude. L'équipe de terrain sera si possible multidisciplinaire (hydrologue, hydrogéologue et botaniste). Les botanistes seront peut-être à même d'identifier des plantes susceptibles d'indiquer une évacuation d'eau souterraine dans le site ; cela implique toutefois que la végétation présente reflète véritablement l'hydrologie actuelle d'une zone humide. Il est notamment conseillé d'essayer de visiter la zone humide a) après une période prolongée de précipitations, pour essayer de trouver des sources ou des cours d'eau éphémères et b) après une période prolongée de sécheresse, lorsque les types de végétation peuvent indiquer des endroits où la zone humide est tributaire d'eaux souterraines durant la saison sèche ou les épisodes de sécheresse. On prendra des photographies pour garder des traces de caractéristiques particulières, telles que déversoirs ou écluses, répartition de la végétation, et réseaux de canaux. Des trous de tarière³ seront creusés pour étudier les caractéristiques du sol de la zone humide, notamment pour identifier les zones gorgées d'eau en permanence durant la saison sèche, susceptibles de refléter une

³ Une tarière est un outil portatif, souvent de forme hélicoïdale, servant à prélever de petits échantillons de terre/carottes (<5 cm de diamètre, 30 cm de long).

dépendance vis-à-vis des eaux souterraines. Dans la mesure du possible, on posera des questions aux habitants, notamment aux agriculteurs, pour obtenir des renseignements empiriques sur les mécanismes de transfert d'eau ou les changements survenus dans le site (p. ex. : y a-t-il des sources qui alimentent la zone humide ? Sont-elles pérennes ?). Ces informations devraient permettre de vérifier sur le terrain le modèle conceptuel théorique ou d'identifier de nouveaux aspects non encore couverts.

- iii) **Mesures et programmes de surveillance sur le terrain.** La quantification des échanges des eaux souterraines avec les zones humides exige des données de terrain. Tandis que certaines données, comme le niveau des eaux souterraines, peuvent être obtenues auprès des services hydrométriques, il se révèle nécessaire de récolter des données de terrain sur le site concerné pour la plupart des études des zones humides. Ces données peuvent inclure les mesures d'une sonde à niveau d'eau (dip well) ou les niveaux piézométriques du sol de la zone humide ou de l'aquifère sous-jacent, ainsi que les caractéristiques du sol, telles que rendement spécifique ou conductivité hydraulique. Cette compréhension initiale servira de point de départ à des programmes de surveillance sur le terrain, destinés à recueillir les données nécessaires sur une période donnée plutôt qu'en se fondant sur une évaluation unique. Ces données contribueront à une compréhension plus détaillée et à la construction de modèles numériques connexes.

53. Bien que ces trois niveaux de collecte d'information soient présentés en étapes séquentielles, il n'en va pas forcément ainsi dans la réalité. De plus, le processus peut être cyclique. Par exemple, on peut reconnaître précocement dans une évaluation d'impact sur une zone humide qu'un modèle détaillé se révélera nécessaire. Ainsi la collecte de données appropriées et l'élaboration d'un modèle peuvent commencer. Ultérieurement, des informations empiriques seront recueillies pour affiner ou modifier les connaissances préalablement acquises, par exemple en identifiant des sources lors d'une visite en saison humide.

4.4 Évaluer les connaissances par les bilans hydriques

54. Après avoir compris le principe du fonctionnement hydrologique d'une zone humide et effectué une coupe transversale comme celle de la figure 7, il convient de tester et de confirmer ces connaissances, ou encore de les affiner. Pour ce faire, on peut effectuer un bilan hydrique, c'est-à-dire quantifier la vitesse de transfert d'eau. Le principe consistant à équilibrer les flux d'entrée, le stockage et les flux de sortie permet de vérifier que tous les transferts d'eau ont été dûment pris en compte et quantifiés.

Mécanisme de transfert d'eau – flux d'entrée dans la zone humide			Mécanisme de transfert d'eau – flux de sortie de la zone humide	
P	précipitations directes (pluie, neige, rosée, etc.) +	=	E	évaporation +
R	apport superficiel et subsuperficiel peu profond +		δV	changement du volume d'eau stockée dans la zone humide +
L	apport latéral +		D	drainage +
OB	apport par débordement de cours d'eau +		OF	écoulement de surface +
PU _i	eau pompée +		PU _o	eau pompée +
S	eau des sources +		GR	recharge des aquifères +
GD	émergence d'eau souterraine +		TO	écoulement d'eau vers la mer sous l'influence des marées
GS	infiltration d'eau souterraine +			
TI	apport d'eau de mer sous l'influence des marées			
				Où δV peut être positif ou négatif

Figure 8. Équilibrer les flux d'entrée et de sortie potentiels du mécanisme de transfert d'eau d'une zone humide (La figure 7 donne une représentation schématique).

55. Le bilan hydrique est un test quantitatif clé des connaissances hydrologiques, mais ne constitue normalement qu'une première étape car il traite de transferts de volumes bruts d'eau et non pas de processus hydrologiques en soi. Ainsi, il peut ne pas être possible de fournir des réponses complètes aux évaluations d'impacts des changements de régime sur les zones humides.
56. Bien qu'un bilan hydrique soit en principe simple à effectuer, il n'en va pas toujours ainsi dans la pratique. Beaucoup de zones humides ont une multitude de canaux de surface - naturels et artificiels – les reliant à des cours d'eau, ou entretiennent une association complexe avec un aquifère sous-jacent, autant de caractéristiques à prendre en compte dans le bilan hydrique.
57. Le bilan hydrique d'une zone humide consiste à comparer la quantité d'eau totale arrivant dans la zone humide avec la quantité d'eau totale sortant de la zone humide (voir figure 8). À l'aide de la liste des mécanismes de transfert d'eau figurant à l'annexe 1, il est possible de résumer le bilan hydrique d'une zone humide par une simple addition des entrées et des sorties d'eau (voir figure 7 pour une représentation schématique des flux d'entrée et des flux de sortie). Les éléments de la figure 8 peuvent être exprimés à l'aide de l'équation ci-après :

$$(P + R + L + OB + PU_i + S + GD + GS + TI) - (E + D + OF + PU_o + GR + TO) = \delta V \quad [1]$$

Flux d'entrée dans la zone humide **Flux de sortie de la zone humide**

58. Ainsi, si les flux d'entrée excèdent les flux de sortie, le stockage (V) augmente et le niveau d'eau de la zone humide monte. En revanche, si le rapport s'inverse (flux d'entrée inférieurs aux flux de sortie), le stockage (V) décline et le niveau d'eau de la zone humide s'abaisse.
59. Les mécanismes de transfert d'eau qui n'existent pas dans une zone humide donnée ne jouent évidemment aucun rôle dans le bilan hydrique. Lorsque, dans un bilan hydrique, le total approximatif des flux d'entrée n'égale pas celui des flux de sortie, cela peut indiquer qu'un mécanisme de transfert d'eau potentiellement important a été omis ou n'a pas été précisément mesuré. Ainsi, le bilan hydrique peut aider à mettre en évidence des zones nécessitant des recherches supplémentaires ou plus détaillées.

4.5 Incertitude dans l'évaluation de l'équation du bilan hydrique

60. La quantification du bilan hydrique ne peut être qu'imprécise, car il est impossible de mesurer avec précision toutes les vitesses de transfert d'eau. Bien que cette incertitude soit souvent mal perçue, voire associée à une fausse manœuvre, elle n'en est pas moins réelle, surtout lorsqu'on traite de systèmes naturels. Mieux vaut donc être explicite à son sujet que de la dissimuler. Il faudrait si possible évaluer l'incertitude (ou le degré de confiance) associé à tout mécanisme de transfert d'eau, afin de pouvoir se concentrer ensuite sur la mesure plus précise des mécanismes les plus incertains. Pour évaluer l'incertitude, on peut, par exemple, quantifier la vitesse d'écoulement de chaque mécanisme de transfert d'eau en utilisant diverses méthodes. La gamme de résultats ainsi obtenue aide à définir le degré d'incertitude avec lequel le mécanisme de transfert d'eau a été défini. Lorsqu'on ne peut pas choisir entre différentes estimations de mécanismes de transfert d'eau, on peut adopter une valeur moyenne, sachant toutefois qu'il est utile de disposer d'une gamme de valeurs pour vérifier le bilan hydrique.
61. Pour vérifier le bilan hydrique, on compare le volume des flux d'entrée à celui des flux de sortie. Si ces volumes correspondent approximativement, on dit que le bilan hydrique est « fermé ». Toutefois, étant donné que toutes les mesures des mécanismes de transfert d'eau présentent un certain degré d'incertitude, le bilan hydrique ne sera jamais exactement fermé. Dans la pratique, on considère que ce bilan est satisfaisant si le déséquilibre ne dépasse pas les limites d'incertitude des mesures.
62. En étudiant le bilan hydrique, on peut être tenté de présumer que toute eau résiduelle (ou volume d'eau non comptabilisé) doit être égale à un mécanisme de transfert d'eau particulier censé exister, mais sur lequel il n'y a pas de données. Par exemple, si dans une zone humide censée être alimentée par des eaux souterraines, le volume des précipitations est inférieur à celui des flux de sortie, on sera tenté de conclure que l'évacuation des eaux souterraines doit être égale à la différence entre les précipitations et les flux de sortie. Toutefois, cette eau apparemment non comptabilisée peut résulter de données inexactes concernant les précipitations ou les flux de sortie, ou encore les apports d'un autre mécanisme, par exemple une source qui n'a pas été identifiée. En conséquence, aussi incertain le résultat puisse-t-il se révéler, tout mécanisme de transfert d'eau doit être évalué indépendamment et vérifié sur la base du bilan hydrique. Définir un bilan hydrique peut donc constituer un processus itératif, allant de pair avec l'acquisition d'une connaissance conceptuelle complète de la zone humide.
63. Un exemple de bilan hydrique figure à l'annexe 3.

4.6 Définir les limites du bilan hydrique

64. Le bilan hydrique sera, si possible, entrepris pour la zone humide elle-même en tant qu'unité hydrologique indépendante. Toutefois, s'il faut subdiviser la zone humide en unités hydrologiquement distinctes, il convient de calculer les équilibres hydriques séparément pour les différentes unités hydrologiques. Il en serait ainsi, par exemple, là où un déversoir garantit des niveaux d'eau dans différentes parties d'une zone humide. Il peut également se révéler avisé de diviser la zone humide en différentes unités hydrologiques lorsque divers mécanismes de transfert d'eau sont évidents, comme on le voit pour les zones de la figure 7.
65. Dans certaines situations, des unités hydrologiques plus vastes que la zone humide elle-même ont été adoptées et un bilan hydrique régional ou à grande échelle a été établi pour l'ensemble de l'aquifère dans lequel se situe la zone humide, plutôt que pour la zone humide elle-même. Cela se justifie souvent sur la base de la forte connectivité hydraulique connue entre l'aquifère et les zones humides. Bien qu'elle évite de devoir mesurer ou évaluer les mécanismes de transfert d'eau entre la zone humide elle-même et l'aquifère, cette approche devrait si possible être évitée, car la relation entre les zones humides et l'aquifère peut être complexe, et les impacts de l'exploitation de cet aquifère sur la zone humide ne peuvent être déterminés en utilisant une approche régionale ou à grande échelle.

4.7 Choix de l'intervalle de temps pour le bilan hydrique

66. L'intervalle de temps (p. ex., mensuel, saisonnier, annuel) qui est utilisé pour le bilan hydrique est normalement choisi en fonction des informations recherchées et des objectifs de l'étude. Lorsqu'on a besoin de résultats rapides, on utilise les données à portée de main. Les données pluviométriques sont généralement disponibles sous forme de valeurs journalières, tandis que les données sur les eaux souterraines sont le plus souvent enregistrées chaque mois. Les sondes à niveau d'eau (« dip wells ») dans les zones humides, qui servent à surveiller le niveau des nappes d'eau souterraines, se lisent généralement tous les 15 jours ou une fois par mois. Cet intervalle s'explique par la connectivité hydraulique relativement faible de certains sols de zones humides, qui implique que le niveau ne change de manière significative que sur de tels intervalles, et que les mesures journalières ou à plus haute résolution ne sont souvent pas indispensables.
67. Dans certains cas, les objectifs de gestion d'une zone humide pourront se concentrer sur une partie du cycle biologique d'une espèce donnée. Il conviendra néanmoins de tenir compte de l'écosystème général et de ses besoins en eau tout au long de l'année. Par exemple, même si l'objectif premier est la conservation des échassiers (oiseaux de rivage) durant leur saison de reproduction, la structure globale de la végétation est aussi importante pour le maintien de l'habitat des oiseaux, aussi doit-on tenir compte du régime hydrologique tout au long de l'année.

4.8 Période d'enregistrement

68. Il n'existe pas de réponse unique à la question de savoir quelle doit être la durée de l'enregistrement pour évaluer un bilan hydrique.

69. Généralement, la période analysée devrait être aussi longue que possible et inclure des périodes humides, sèches et plus 'normales', couvrant la variabilité de base du climat sur place. En réalité, là où il existe des enregistrements de longue durée, on peut envisager d'entreprendre une analyse des impacts des fluctuations ou changements climatiques, mais ces ensembles de données sont rares. Là où il n'existe que des enregistrements sur de brèves périodes pour la zone humide concernée, la période d'enregistrement sera classée sèche, humide ou normale, par référence à d'autres données à plus long terme sur la pluviométrie, le débit des cours d'eau, ou le niveau des nappes souterraines.
70. Quelle que soit la durée de l'enregistrement choisie, il est toujours recommandé de continuer ou d'entreprendre une surveillance après évaluation, afin de pouvoir évaluer ultérieurement les résultats, une fois que des données supplémentaires auront été recueillies, et d'affiner le bilan hydrique à ce moment-là.

4.9 Prévoir les impacts hydrologiques par la modélisation

71. L'approche du bilan hydrique décrite ci-dessus peut aider à évaluer la connaissance des mécanismes de transfert d'eau présents et du volume des mouvements d'eau concernés dans chaque mécanisme. Toutefois, le bilan hydrique ne saurait permettre de déterminer ou de prévoir de façon définitive les incidences, pour une zone humide, d'impacts hydrologiques tels que l'exploitation des eaux souterraines. Il ne comporte pas non plus d'informations sur le calendrier et la fréquence des événements hydrologiques. Pour définir ces propriétés hydrologiques, il convient d'adopter une approche de modélisation plus détaillée.
72. Divers types de modèle ont été employés pour étudier les interactions entre les zones humides et les eaux souterraines. Lorsque les sols sont perméables (p. ex., tourbières), le comportement de la nappe phréatique au niveau du sol a été modélisé en utilisant la théorie du drainage des terres et de la physique des sols. Les modèles vont de solutions analytiques à des modèles aux éléments finis, complexes et multidimensionnels.
73. Donner des conseils sur des types spécifiques de modélisation dépasse le cadre des présentes orientations et mieux vaudra s'adresser à des spécialistes de la modélisation. En général, plus le modèle est compliqué, plus on peut représenter d'aspects du système et plus on peut avoir confiance dans les résultats. En règle générale, pour les études préliminaires globales, on peut utiliser des méthodes simples, alors que pour les études d'impact sur l'environnement, on peut être appelé à recourir à une modélisation détaillée.
74. On notera toutefois qu'il ne suffit pas de recueillir des données supplémentaires et d'utiliser un modèle plus complexe pour garantir une amélioration de la connaissance. Même lorsqu'on s'attend à avoir besoin d'un modèle complexe en dernier ressort, l'analyse doit toujours commencer par une simple image conceptuelle de la zone humide, qui se complique à mesure que la connaissance se développe. Il est essentiel de commencer par avoir une connaissance conceptuelle correcte des mécanismes de transfert d'eau, avant de pouvoir utiliser la modélisation pour :
- produire des informations quantitatives sur les processus actionnant les mécanismes de transfert d'eau ;
 - comprendre la variabilité temporelle et spatiale de ces processus ; et

- prévoir ce qui va se passer dans des scénarios climatiques ou de gestion de l'eau dépassant l'éventail de données disponibles pour la zone humide.
75. L'hydrologie des zones humides est une science relativement nouvelle et aucun modèle n'a encore été établi traitant explicitement des processus hydrologiques au sein d'une zone humide et des mécanismes de transfert d'eau à partir d'une zone humide et vers elle. En revanche, les modèles élaborés pour analyser les inondations, le drainage des sols et les ressources en eaux souterraines ont été adaptés pour évaluer les processus hydrologiques dans les zones humides et les impacts sur les zones humides.
76. Des modèles tels que MODFLOW sont utilisés dans le monde entier pour la modélisation des systèmes aquifères comprenant, dans certains cas, la représentation d'une zone humide locale. Des détails figurent dans des ouvrages tels que Fetter (1994). Divers modules ont été rédigés pour ces modèles d'eaux souterraines, permettant d'inclure les cours d'eau, les canaux de drainage et certaines caractéristiques des zones humides. Ces modules permettent donc d'obtenir une analyse détaillée utilisable pour évaluer les impacts de la gestion des eaux souterraines. Quelques études (p. ex., Thompson *et al.* 2004) comportent des modèles couplés (eaux de surface - eaux souterraines) pour évaluer les zones humides, mais ces applications n'en sont encore qu'au stade expérimental. Pour en savoir plus sur les techniques de modélisation, consulter des ouvrages tels que Kirby *et al.* (1994) ; MODFLOW peut être téléchargé gratuitement à l'adresse : <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow.html>.

5. Vers un cadre pour l'élaboration de stratégies de gestion des eaux souterraines en vue du maintien des écosystèmes des zones humides

77. Une fois qu'il aura préparé les examens techniques mentionnés à la section 1 des présentes lignes directrices, le GEST s'efforcera de réviser et mettre à jour ces lignes directrices pour pouvoir offrir des avis techniques plus détaillés sur l'élaboration de stratégies de gestion des eaux souterraines visant à maintenir des écosystèmes des zones humides, ainsi qu'à essayer de réduire le plus possible ou d'atténuer les impacts de l'exploitation des eaux souterraines à des fins commerciales, domestiques ou agricoles.
78. Pour le moment, le cadre préliminaire en sept étapes a été établi (tableau 1). Il comporte les principaux thèmes ou sujets de préoccupations sur lesquels les administrateurs des zones humides devraient communiquer et collaborer avec les gestionnaires des ressources en eau afin de garantir la prise en compte de la protection et du maintien des écosystèmes des zones humides dans les plans de gestion des eaux souterraines et des eaux superficielles.
79. Le cadre en sept étapes pour les eaux souterraines est avant tout une série d'activités techniques, imbriquée dans le Chemin critique de la gestion des bassins hydrographiques (voir Résolution IX.1 Annexe C i.) et visant à fournir les informations et connaissances pertinentes sur les eaux souterraines, pour faciliter l'intégration des eaux souterraines dans la gestion des zones humides à l'échelle du bassin hydrographique.
80. Le tableau 1 indique la correspondance entre les étapes liées aux eaux souterraines et les étapes liées au Chemin critique de la gestion des bassins hydrographiques (GBH).

81. Lorsqu'une étape s'étend à la fois sur la colonne des eaux souterraines (à gauche) et sur celle de la GBH (à droite), par exemple comme dans les Étapes 1 et 2 de la GBH, cela signifie que l'étape du Chemin critique de la GBH en question comporte implicitement des aspects en rapport avec les eaux souterraines, et qu'aucune orientation distincte, liée aux eaux souterraines n'est fournie.
82. Lorsqu'il existe une étape distincte en rapport avec les eaux souterraines, par exemple l'Étape A, cela implique qu'une orientation concernant spécifiquement les eaux souterraines est fournie, et que les activités décrites dans cette étape doivent être intégrées aux activités faisant partie de l'étape du Chemin critique de la GBH correspondante. Ainsi, lorsqu'on mène à bien l'Étape 3(i) du cadre du Chemin critique de la GBH (inventaire des zones humides d'un bassin), il importe d'inclure l'Étape A sur les eaux souterraines (sélection) pour identifier les zones humides susceptibles d'être associées à des eaux souterraines dans l'inventaire du bassin.
83. Les sept étapes (A à G) sont décrites plus loin.

Tableau 1. Correspondance, en ce qui concerne le maintien des caractéristiques écologiques des zones humides, entre les étapes du cadre de gestion des eaux souterraines et celles du Chemin critique de la gestion des bassins hydrographiques (GBH) (d'après la Résolution IX.1 Annexe C i).

Cadre de gestion des eaux souterraines (Étapes A à G)	Chemin critique de la GBH (Étapes 1 à 9)
Étape 1 : Contextes politique, réglementaire et institutionnel	
Étape 2 : Conception du processus de participation des acteurs	
Étape A : Examen préalable en vue d'identifier les zones humides potentiellement associées aux eaux souterraines	Étape 3(i) : Inventaire des zones humides du bassin
Étape 3(ii) : Évaluation de l'état et des tendances actuels	
Étape B : Élaboration d'un modèle conceptuel des interactions eaux souterraines-zones humides.	Étape 3(iii) : Déterminer la fonction hydrologique des zones humides
Étape C : Évaluation de la situation - impacts conjugués, état et tendances - en privilégiant l'interface eaux souterraines-zones humides	
Étape 4 : Fixation des priorités pour les zones humides du bassin	
Étape D : Détermination des besoins en eau souterraine des zones humides	Étape 5 : Fixation des objectifs quantitatifs de gestion pour les zones humides
Étape E : Détermination et fixation des attributions d'eau souterraine pour les zones humides, et les limites de l'exploitation des eaux souterraines.	
Étape F : Intégration de mesures et stratégies liées aux eaux souterraines dans les plans de gestion du sol et de l'eau pour le bassin.	Étape 6 : Plan de gestion intégrée de l'eau et des sols pour le bassin
Étape 7a : Mise en œuvre à l'échelle des zones humides Étape 7b : Mise en œuvre à l'échelle du bassin	
Étape G : Suivi et évaluation liés aux eaux souterraines	Étape 8 : Suivi et établissement de rapports à l'échelle du bassin et des zones humides
Étape 9 : Examen, réflexion et révision des priorités	

Étape A : Examen préalable en vue d'identifier les zones humides potentiellement associées aux eaux souterraines

84. Dans le paysage, on considérera les zones humides dans trois dimensions : la forme latérale et la taille d'une zone humide, ainsi que sa morphologie, sont fortement influencées par la topographie et l'hydrologie. Toutefois, on ne saurait avoir une compréhension complète des fonctions d'une zone humide liées à l'eau sans considérer le contexte géologique de la zone humide. En fonction de la géologie sous-jacente et environnante, une zone humide sera plus ou moins fortement associée aux eaux souterraines et dépendant de celles-ci. Un examen préalable au niveau du bassin hydrographique devrait indiquer si les zones humides du bassin sont susceptibles d'être étroitement associées aux eaux souterraines, et le type d'interaction auquel on peut s'attendre. Des études plus détaillées, comprenant, si possible des visites sur le terrain, seraient néanmoins utiles pour confirmer ces associations dans le cas de chaque zone humide.
85. L'examen préalable consistera notamment à superposer les cartes de la géologie, de la végétation et de l'occupation des sols. En outre, les chiffres généraux sur la recharge et le taux d'exploitation (figurant en principe dans les plans de gestion des ressources en eau) seront assemblés afin de déterminer où les ressources en eaux souterraines sont exploitées. Le résultat de cet exercice consistera à identifier les zones humides reliées à des eaux souterraines (en tant que sites de recharge ou d'évacuation) et qui exigent une étude plus détaillée.

Étape B : Élaboration d'un modèle conceptuel des interactions eaux souterraines-zones humides pour les zones humides du bassin

86. On établira un modèle conceptuel pour chaque zone humide identifiée lors de l'examen préalable comme étant susceptible d'être influencée par une exploitation actuelle ou future des eaux souterraines. Il peut s'agir d'un simple exercice théorique ou d'études de terrain détaillées et de modélisation numérique. Pour élaborer le modèle conceptuel, on commencera par définir les mécanismes de transfert d'eau régissant les entrées et les sorties d'eau de chaque zone humide. Le calcul du bilan hydrique peut aider à quantifier les apports d'eau de diverses sources et toute recharge en eaux souterraines des aquifères. Le bilan hydrique devrait être calculé pour différentes saisons et pour les périodes de sécheresse et d'humidité. L'incertitude inhérente à l'estimation de l'ampleur des mécanismes de transfert d'eau devrait être explicite afin de donner un contexte de risque.
87. Cette information est nécessaire pour quantifier la dépendance d'une zone humide vis-à-vis des eaux souterraines et, inversement, la dépendance potentielle d'un aquifère vis-à-vis des zones humides associées, afin de pouvoir quantifier les besoins en eau souterraine des zones humides associées et, inversement, la quantité d'eau nécessaire aux zones humides pour assurer la recharge de la nappe souterraine.

Étape C : Évaluation de la situation : impacts conjugués, état et tendances

88. Dans la plupart des bassins hydrographiques contenant des ressources en eau souterraine exploitables, on trouve des particuliers et/ou des entreprises qui extraient de l'eau des trous d'eau. Or, cette utilisation n'est pas toujours dûment contrôlée, surtout lorsque l'eau souterraine est considérée comme privée en vertu de la loi. D'autres exploitations des eaux superficielles peuvent ou non être connues et contrôlées.

89. Il est essentiel que toute évaluation de l'état actuel des eaux souterraines-zones humides associées inclue aussi une évaluation des impacts séparés et combinés de l'exploitation et de l'alimentation des nappes d'eau souterraine et de surface du bassin.
90. Il est tout aussi important de voir comment un changement au niveau de la couverture terrestre et des caractéristiques du sol peut affecter la recharge d'un aquifère et, par conséquent, l'approvisionnement en eau de la zone humide. Par exemple, on estime que la végétation du lit du Kuseb (une rivière intermittente du désert du Namib, en Afrique), joue un rôle clé en ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface du sol en régime de crue, et favorise ainsi la recharge locale de l'aquifère extrêmement important du Kuseb. Il conviendrait d'utiliser des scénarios plus généraux de changements dans l'occupation des sols ou de changements climatiques pour l'unité bassin versant ou l'unité aquifère, afin d'évaluer l'évolution future des interactions entre les eaux souterraines et les zones humides.

Étape D : Détermination des besoins en eau souterraine des zones humides

91. La quantification des mécanismes de transfert d'eau représente la composante hydrologique de l'évaluation des interactions entre zones humides et eaux souterraines. Généralement, l'écosystème de zone humide (y compris ses composantes, p. ex., sols, espèces animales et végétales, ses fonctions, p. ex., recharge des nappes souterraines ou recyclage des nutriments, et ses attributs, p. ex., diversité biologique) sera adapté au régime hydrologique, notamment à l'ampleur, à la fréquence, à la durée et au rythme des mécanismes de transfert d'eau. Bien que les changements majeurs subis par l'hydrologie d'une zone humide entraînent normalement une altération significative des caractéristiques écologiques, tel n'est pas forcément le cas des changements hydrologiques mineurs.
92. L'Étape D exige la détermination des principaux besoins en eau de l'écosystème de zone humide, ainsi que de sa sensibilité aux changements hydrologiques, de sa résilience et de sa capacité d'adaptation. Cela permet de définir les incidences des changements hydrologiques sur l'écosystème de zone humide. Des orientations supplémentaires sur les besoins en eau des zones humides figureront dans les *Rapports techniques Ramsar* préparés par le GEST.

Étape E : Détermination et fixation des attributions d'eau souterraine pour les zones humides

93. Les besoins en eau souterraine des zones humides doivent être rendus explicites afin de pouvoir être inclus au moment de la détermination du rendement durable de l'aquifère et de l'attribution subséquente des ressources en eau disponibles pour différents usages. Ainsi, les incidences sur la zone humide des différentes options d'attribution d'eau souterraine peuvent être étudiées par les gestionnaires de l'eau et par la société, et inclus dans les plans d'attribution d'eau pour le bassin. Souvent l'eau disponible ne suffit pas pour satisfaire toutes les demandes. Toutefois, si les implications pour les caractéristiques écologiques et les moyens d'existence dépendants sont connues des décideurs, les besoins en eau des zones humides peuvent être considérés en même temps que d'autres utilisations de l'eau.
94. Une quantité d'eau suffisante devrait être attribuée aux zones humides de surface ou souterraines dépendantes de l'aquifère, afin de maintenir les caractéristiques écologiques souhaitées, même si cela exige un compromis avec l'exploitation autorisée à des fins

industrielles, domestiques ou agricoles. L'attribution de grandes quantités d'eau de nappes souterraines, y compris pour le maintien des zones humides, devrait être déterminée simultanément au niveau du bassin ou de l'unité aquifère, et au niveau de la zone humide individuelle.

Étape F: Intégration de mesures et stratégies liées aux eaux souterraines dans les plans de gestion du sol et de l'eau pour le bassin

95. Certaines stratégies spécifiques aux eaux souterraines peuvent être incluses dans le plan de gestion du sol et de l'eau pour le bassin, afin de minimiser les impacts de l'exploitation des eaux souterraines sur les zones humides associées. Par exemple :
- Les nappes souterraines peuvent constituer la principale source d'eau d'une zone humide à certaines périodes de l'année, par exemple en saison sèche ou en période de sécheresse ; des prélèvements d'eau plus importants peuvent ainsi être autorisés durant les périodes humides, quand la zone humide ne court aucun danger, afin d'équilibrer les prélèvements réduits lorsque la zone humide se trouve en situation critique.
 - Les sondages ne devraient pas se trouver à proximité de la zone humide, où le cône de dépression réduirait le niveau d'eau de la zone humide et entraînerait une dégradation des caractéristiques écologiques.
 - Lorsque des zones humides sont alimentées conjointement par des eaux de surface et des eaux souterraines, il est possible de satisfaire les besoins en eau à différentes saisons à partir de différentes sources (c.-à-d. gestion conjointe). On pourrait par exemple envisager de soutenir ou de restaurer une zone humide jadis alimentée par des eaux souterraines, en libérant des quantités d'eau de surface d'un barrage situé en amont. Toutefois, il est également essentiel de tenir compte de l'aspect qualitatif des besoins en eau de la zone humide, sachant que la qualité des eaux superficielles peut être très différente de celle des eaux souterraines.

Étape G : Surveillance et évaluation liées eaux souterraines

96. Il est nécessaire de surveiller l'état des ressources en eau souterraine et des besoins en eau souterraine, en même temps que l'état et la réaction des zones humides aux changements de disponibilité d'eau souterraine, surtout lorsqu'il s'agit de zones humides associées à de vastes aquifères régionaux, dont les limites peuvent s'étendre au-delà du bassin versant.
97. Il devrait également y avoir une surveillance à long terme des tendances des niveaux d'eau souterraine dans les sites ou les régions où les ressources en eau sont actuellement exposées à une exploitation intensive ou sont susceptibles de l'être à l'avenir, y compris dans les cas d'adoption généralisée de méthodes de prélèvement d'eau souterraine à petite échelle (p. ex., effet cumulé de l'utilisation de pompes par les petits agriculteurs pour irriguer leurs cultures).
98. La végétation des zones humides peut servir d'indicateur d'alerte rapide (p. ex., de stress hydrique) de la surexploitation à court terme. Ce système est utilisé avec succès par une grande compagnie minière pour réguler son exploitation des eaux souterraines au bord du

Limpopo, en Afrique australe. Toutefois, la surveillance des piézomètres constitue le plus souvent la méthode privilégiée pour évaluer les impacts de l'exploitation.

99. Les ensembles de données à long terme sur les caractéristiques et la variabilité des eaux souterraines sont généralement limités, notamment du fait que le niveau et la qualité des eaux souterraines tendent à varier lentement sous l'effet de certains facteurs, notamment climatiques ; par conséquent, les périodes de mesure doivent être nettement plus longues afin d'établir les propriétés spatio-temporelles naturelles de la variabilité des eaux souterraines. Étant donné le manque généralisé de données, il est essentiel d'adopter une approche adaptative pour l'établissement et la mise en œuvre des objectifs. Un programme de surveillance approprié sera appliqué pour fournir des informations permettant d'affiner le modèle conceptuel et, par la suite, la détermination des besoins en eau souterraine des zones humides, et d'affiner ou de revoir les attributions réelles en eaux souterraines faites pour les zones humides comme forme de gestion adaptative.
100. D'autres avis sur la surveillance des zones humides se trouvent dans le Cadre permettant de concevoir un programme efficace de surveillance continue des zones humides (Résolution VI.1 ; Manuel Ramsar 8 sur l'utilisation rationnelle, Section D).

6. Glossaire

alimentation des eaux souterraines	mouvement de l'eau vers un aquifère, p. ex. percolation depuis une zone humide
aquiclude	roches et sédiments contenant de petites quantités d'eau et laissant l'eau s'écouler lentement, p. ex., mudstone grossier
aquifère	roches et sédiments emmagasinant de l'eau et permet son écoulement, p. ex., calcaire, craie
aquifère confiné	recouvert d'une couche peu perméable (aquitard ou aquiclude) qui restreint les flux d'eau d'entrée et de sortie de l'aquifère
aquifère non confiné	qui n'a pas de couches sus-jacente peu perméables (aquitard ou aquiclude)
aquitard	roches et sédiments contenant très peu d'eau et empêchant l'écoulement d'eau souterraine, p. ex., glaise
bilan hydrique	comparaison du volume des entrées et sorties d'eau d'une zone humide, en tenant compte du changement de stockage d'eau dans la zone humide
exploitation des eaux souterraines	prélèvement d'eau dans un aquifère, généralement par pompage, à usage agricole, industriel ou public
conductivité hydraulique	vitesse à laquelle l'eau peut se déplacer à travers des roches ou sédiments
eaux souterraines	eaux emmagasinées dans des roches perméables, p. ex. calcaires ou sédiments non consolidés tels que sable et gravier
gradient piézométrique	niveau que les eaux souterraines atteindraient si elles ne se heurtaient pas à une couche peu perméable au-dessus de l'aquifère (aquiclude ou aquitard) ou n'étaient pas épuisées, p. ex., par l'évaporation ou l'exploitation

mécanismes de transfert d'eau	moyens par lesquels l'eau pénètre dans une zone humide et en sort
nappe phréatique	niveau d'eau dans un aquifère non confiné, p. ex., d'un puits
perméabilité	mesure dans laquelle l'eau peut se déplacer à travers des roches ou sédiments
piézomètre	tuyau métallique ou en plastique placé verticalement dans le sol de telle sorte que la partie inférieure se trouve dans un aquifère dont on veut mesurer le gradient piézométrique
rendement durable	taux auquel on peut prélever de l'eau d'un aquifère sans occasionner de dégradation à long terme
sonde à niveau d'eau (dip well)	tube perforé, en métal ou plastique, placé verticalement dans la nappe souterraine (comme un puits miniature) pour en mesurer le niveau d'eau
tarière	outil portatif, souvent de forme hélicoïdale, servant à prélever de petits échantillons de terre (<5 cm de diamètre, 30 cm de long), souvent sous forme de carotte
zone non saturée	couche de roche ou sédiment où tous les espaces et fissures ne sont pas remplis d'eau
zone saturée	couche de roche ou de sédiment où tous les espaces et fissures sont remplis d'eau

Références







- Acreman, M.C. 2003 *Wetlands and hydrology*. MedWet Publication 9. Tour du Valat, France.
- Acreman, M.C. 2004 Impact assessment of wetlands: focus on hydrological and hydrogeological issues. Phase 2 report. Environment Agency, Bristol (W6-091) and Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford (C01996)
- Acreman, M.C. and José, P. 2000 Wetlands. In: Acreman, M.C. (ed) *The hydrology of the UK – a study of change*. Routledge, London.
- Cirujano, S., Casado, C., Bernués, M., Camargo, J.A. 1996 Ecological study of Las Tablas de Daimiel National Park (Ciudad Real, Central Spain). Differences in water physico-chemistry and vegetation between 1974 and 1989. *Botanical Conservation*, 75 211-215.
- Custodio, E. 2002 Aquifer over-exploitation; what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10, 254-277
- Fariz, G.H., Hatough-Bouran, A. 1998 Population dynamics in arid regions: the experience of Azraq Oasis Conservation Project. In: de Sherbinin, Alex & Dompka, V. (eds) *Water and population dynamics*. Case studies and policy implications. American Association for the Advancement of Science, Washington D.C.
- Fetter, C.W. 1994 *Applied Hydrogeology*. 3rd Edition, Prentice-Hall, New Jersey.
- Fornés, J.M. and Llamas, M.R. (2001). Conflicts between Groundwater Abstraction for irrigation and Wetland Conservation: Achieving Sustainable Development in the La Mancha Húmeda Biosphere reserve (Spain). In: *Groundwater ecology. A tool for management of water resources*. Griebler, C., danielopol, D., Gibert, J., Nachtnebel, H.P. and Notenboom, J. (eds) European Commission. Environment and Climate Programme - Austrian Academy of Sciences (Institute of Limnology). EUR 19887. pp. 263-275.
- Kirkby, M.J., Naden, P.S., Burt, T.P. & Butcher, D.P. (1993), *Computer Simulation in Physical Geography* Second edition, John Wiley & Sons, Chichester. pp. 190.
- Llamas, M.R. 1989 Wetlands and groundwater, new constraints in groundwater management. In: *Groundwater Management: Quantity and Quality*. International Association Hydrological Sciences, Publ. num. 188, pages: 595-604.

- Morris, B.L., Lawrence, A., Chilton, P.J., Adams, B., Calow, R.C., Klink, B.A. 2003 *Groundwater and its susceptibility to degradation; a global assessment of the problem and options for management*. Report RS033 to UNEP, British Geological Survey, Wallingford, UK.
- Steiner, G.M. 1992 *Österreichischer Moorschutzkatalog*. Styria Medien Service. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
- Thompson, J.R., Hollis, G.E. 1995 Hydrological modelling and the sustainable development of the Hadejia-Nguru wetlands, Nigeria. *Hydrological Sciences Journal* 40, 1, 97-116
- Thompson, J.R., Refstrup Sørensen, H., Gavin, H. and Refsgaard A. 2004 Application of the coupled MIKE SHE / MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in Southeast England. *Journal of Hydrology*. 293, 151-179.

Annexe 1

Mécanismes de transfert d'eau dans les zones humides liées aux eaux souterraines

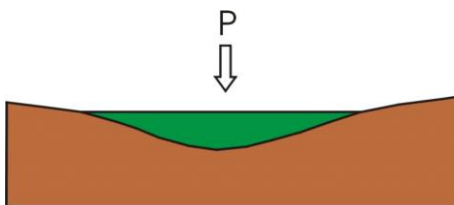
On appelle mécanismes de transfert d'eau les moyens permettant à l'eau de pénétrer dans une zone humide ou d'en sortir. La figure A1 (a à n) présente une liste des mécanismes de transfert d'eau possibles, ainsi que leur association avec des aquifères et des couches moins perméables. Ces mécanismes ne régissent pas nécessairement la distribution d'eau dans une zone humide ou la vitesse du mouvement, mais définissent l'interface hydrologique avec le milieu environnant. Toute zone humide n'est influencée que par un sous-ensemble de ces mécanismes. L'identification des principaux mécanismes peut se faire en recueillant des informations sur l'hydrologie et la géologie de la zone humide.

KEY	LÉGENDE
 Wetland  Water  Low Permeability Strata  Semi-Permeable Strata  Aquifer (e.g. Chalk)  Piezometric Surface	Zone humide Eau Couche peu perméable Couche semi-perméable Aquifère (p. ex. craie) Surface piézométrique

Légende des illustrations

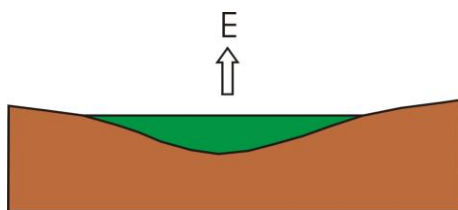
Les couches géologiques varient considérablement dans leur perméabilité, ou la vitesse à laquelle l'eau peut s'écouler (aussi appelée conductivité hydraulique). La couche peu perméable inclut de la glaise, tandis que les couches semi-perméables incluent du sable. La hauteur piézométrique correspond au niveau que les eaux souterraines atteindraient si elles n'étaient pas empêchées par une couche peu perméable qui recouvre l'aquifère (aquiclude ou aquitard) ou épuisées, par exemple, par l'évaporation ou l'exploitation. Dans les aquifères non confinés, la hauteur piézométrique peut être égale à la nappe phréatique observée.

A



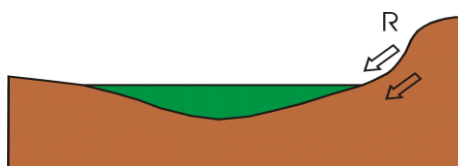
P précipitations. Pluie, neige fondue ou neige tombant directement sur la zone humide, brume et condensation captées.

B



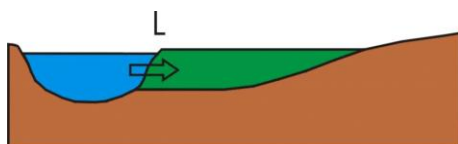
E évaporation. Eau se déplaçant du sol, d'eaux libres ou de la surface des plantes de la zone humide vers l'atmosphère, y compris transpiration.

C



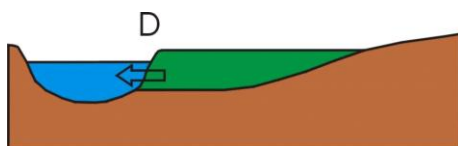
R ruissellement. Eau s'écoulant vers la zone humide dans le sens de la pente, à la surface du sol, dans les cours d'eau ou à travers les couches peu profondes du sol.

D



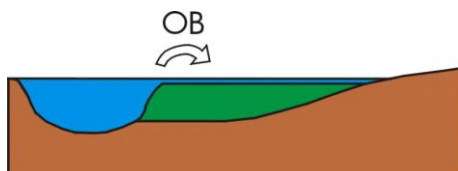
L apport latéral. Eau s'écoulant latéralement dans le sol vers la zone humide, provenant d'un fossé, d'un cours d'eau ou d'un lac. Le niveau de la nappe de la zone humide est inférieur à celui de la source d'eau.

E



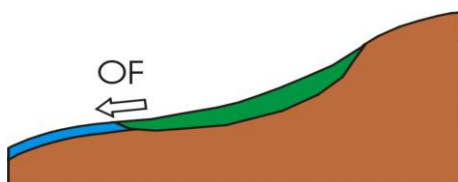
D drainage. Eau se déplaçant latéralement dans le sol, de la zone humide vers un fossé, cours d'eau ou lac. Peut se faire naturellement ou être renforcé par des drains artificiels. Le niveau de la nappe de la zone humide est supérieur à celui de la nappe qui reçoit l'eau.

F



OB débordement. Eau venant d'un fossé, d'un cours d'eau ou d'un lac à la surface de la zone humide. Le niveau d'eau de la nappe d'où provient l'eau est plus élevé que celui de la zone humide.

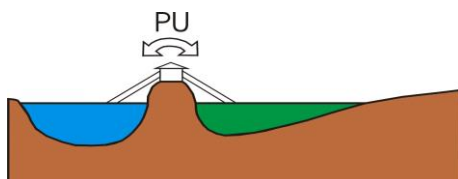
G



OF écoulement. Eau se déplaçant d'une zone humide dans le sens de la pente, vers un cours d'eau. Inclut l'eau qui reflue vers un cours d'eau après une inondation, lorsque le niveau du cours d'eau est redescendu. Le cours d'eau peut naître dans la zone humide.

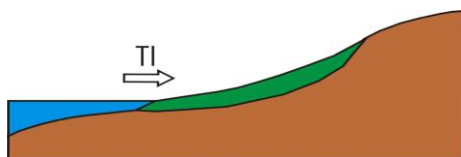
Figure A1. Mécanismes de transfert d'eau dans une zone humide

H



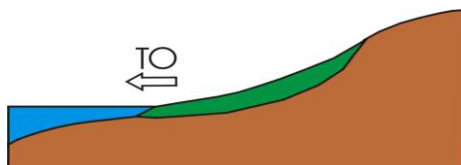
PU pompage. Eau transportée entre une zone humide et un cours d'eau, un lac, un fossé ou la mer par pompage mécanique. Cette eau peut être pompée de ou vers la zone humide

I



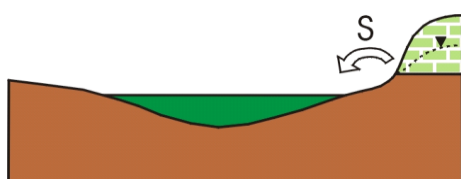
TI flux de marée entrant. Eau de mer pénétrant dans une zone humide à marée montante

J



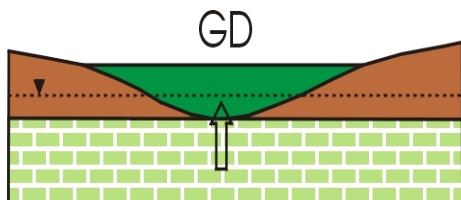
TO flux de marée sortant. Eau salée refluant de la zone humide vers la mer à marée descendante

K



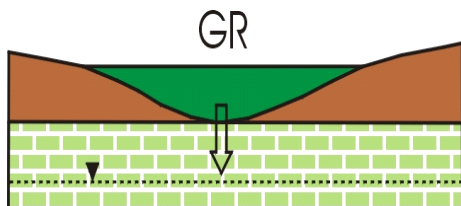
S puits. Eau provenant d'un aquifère s'écoulant à la surface d'une zone humide. Souvent associé à la présence d'un aquiclude sous l'aquifère.

L



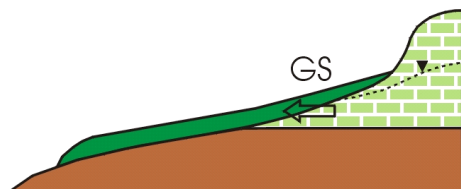
GD écoulement souterrain. Eau provenant d'un aquifère sous-jacent et pénétrant verticalement dans une zone humide. La hauteur piézométrique/niveau d'eau de l'aquifère est supérieure au niveau d'eau de la zone humide. Il peut ou non y avoir une couche moins perméable entre la zone humide et l'aquifère susceptible de limiter le débit d'eau.

M



GR Recharge des eaux souterraines. Eau se déplaçant de haut en bas, d'une zone humide vers un aquifère sous-jacent. La hauteur piézométrique/niveau d'eau de l'aquifère est inférieure au niveau d'eau dans la zone humide. Il peut ou non y avoir une couche moins perméable entre la zone humide et l'aquifère susceptible de limiter le débit d'eau.

N



GS Infiltration des eaux souterraines. Eau se déplaçant latéralement dans une zone humide et venant d'un aquifère adjacent. Il peut ou non y avoir une couche moins perméable entre la zone humide et l'aquifère susceptible de limiter le débit d'eau.

Figure A1 (suite). Mécanismes de transfert d'eau de et vers une zone humide

Annexe 2

Relier la localisation et les mécanismes de transfert d'eau

La typologie hydrologique de zone humide utilisée dans les présentes lignes directrices est basée sur la localisation et les mécanismes de transfert d'eau. Avec la localisation, on obtient 7 types de zone humide correspondant à la définition de «zone humide» au sens de la Convention de Ramsar (figure A2.1). On peut encore subdiviser ces types en fonction des mécanismes de transfert d'eau prédominants, pour obtenir 15 sous-types (tableau A2.1). Ces sous-types dépendent de ce que le mécanisme de transfert d'eau dominant potentiel de chaque type est l'eau de surface ou l'eau souterraine, ou une combinaison des deux. Les figures A2.2 à A2.7 présentent des diagrammes de quelques exemples de zones humides hypothétiques de chaque sous-type. Pour les zones humides de régions à topographie plate, seul le sous-type 'eau de surface' est applicable.

Le sous-type ne peut pas être connu dès le début de l'étude, car la contribution des eaux souterraines à la zone humide est difficile à déterminer. Toutefois, on peut utiliser la typologie pour orienter la compréhension des mécanismes hydrologiques qui peuvent être testés à l'aide de données.

Tableau A2.1 Types de zones humides en fonction de la localisation et sous-types hydrologiques

Localisation	Sous-type basé sur le mécanisme de transfert d'eau
Zones humides plates des hautes terres	Alimentées par l'eau de surface des hautes terres
Zones humides en pente	Alimentées par l'eau de surface
	Alimentées par des eaux superficielles et souterraines
	Alimentées par des eaux souterraines
Zones humides de fond de vallée	Alimentées par l'eau de surface
	Alimentées par des eaux superficielles et souterraines
	Alimentées par des eaux souterraines
Zones humides souterraines	Alimentées par des eaux souterraines
Zones humides de dépression	Alimentées par l'eau de surface
	Alimentées par des eaux superficielles et souterraines
	Alimentées par des eaux souterraines
Zones humides plates des basses terres	Alimentées par l'eau de surface des basses terres
Zones humides côtières	Alimentées par l'eau de surface
	Alimentées par des eaux superficielles et souterraines
	Alimentées par des eaux souterraines

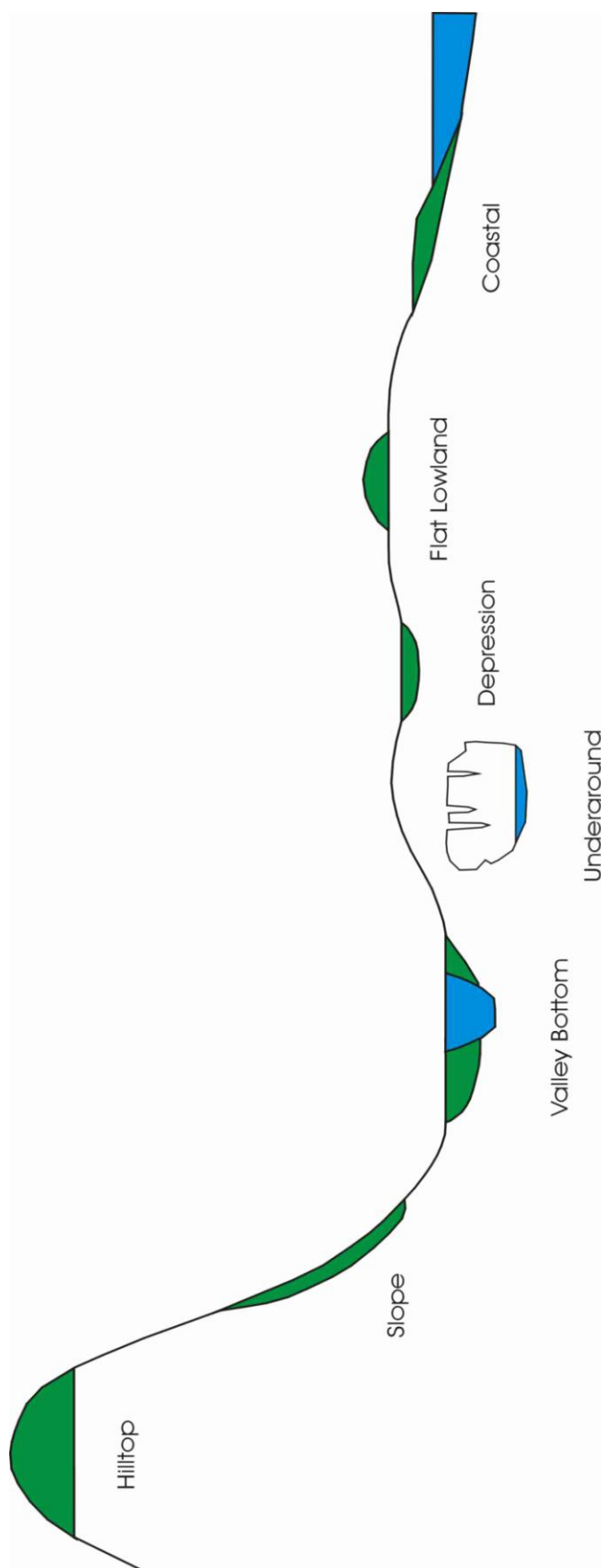


Figure A2.1. Localisation des zones humides

Hautes terres

Pente

Fond de vallée

Souterraine

Dépression

Basses terres

Côtière

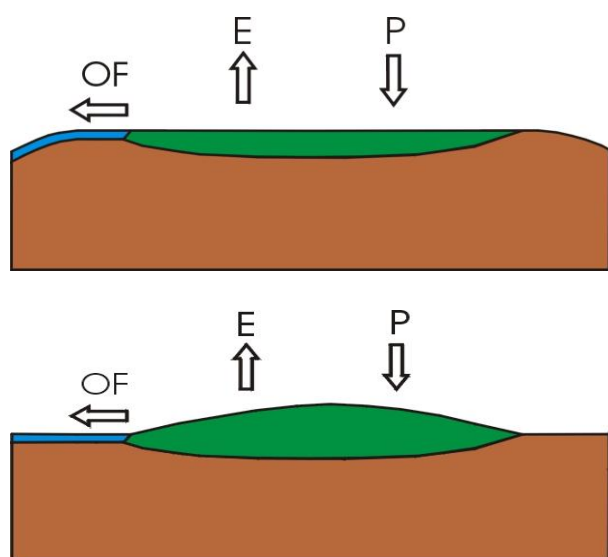
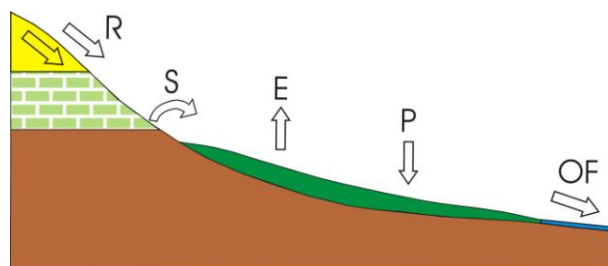


Figure A2.2. Zones humides plates (voir annexe 1 pour la définition des abréviations)



Zones humides plates des hautes terres

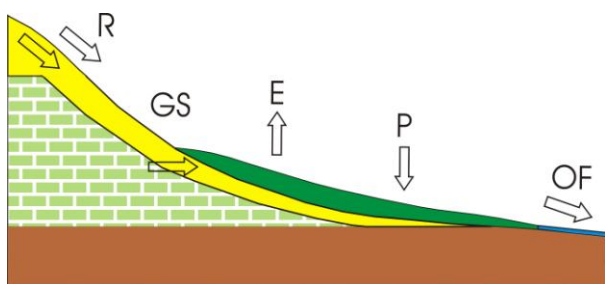
Alimentées par l'eau de surface : Zones humides reposant sur des couches imperméables. Apports dominés par les précipitations. Pertes par évaporation et écoulement de surface. Exemple : tourbières-couverture des hautes terres

Zones humides plates des basses terres

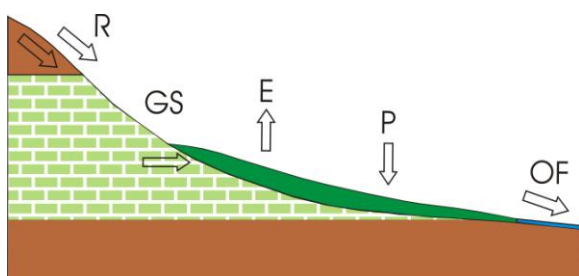
Alimentées par l'eau de surface : Zones humides reposant sur des couches imperméables. Apports dominés par les précipitations. Pertes par évaporation et écoulement de surface. Exemple : tourbières ombrotrophes bombées.

Zones humides en pente

Alimentées par l'eau de surface : Zones humides reposant sur des couches imperméables. Apports dominés par précipitations, ruissellement de surface et source éventuelles. Pertes par évaporation et écoulement de surface

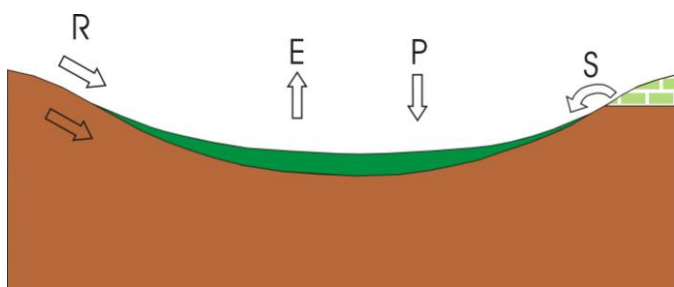


Zones humides en pente
Alimentées par des eaux de surface et souterraines : Zones humides séparées de l'aquifère sous-jacent par une couche moins perméable. Apport par infiltration des eaux souterraines, précipitations et ruissellement de surface. L'apport des eaux souterraines peut être restreint par une couche moins perméable. Pertes par évaporation et écoulement de surface.

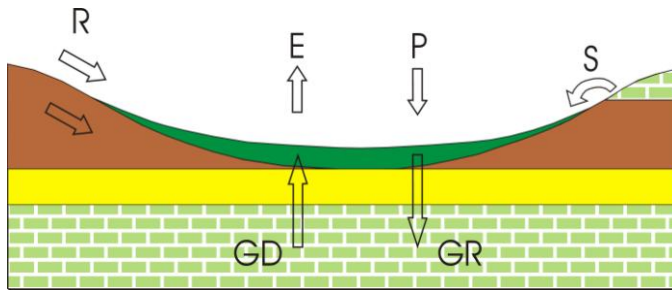


Zones humides en pente
Alimentées par des eaux souterraines : Zones humides en contact direct avec l'aquifère sous-jacent. Apports dominés par l'infiltration des eaux souterraines, complétés par les précipitations et le ruissellement de surface. Pertes par évaporation et écoulement de surface.

Figure A2.3. Zones humides en pente

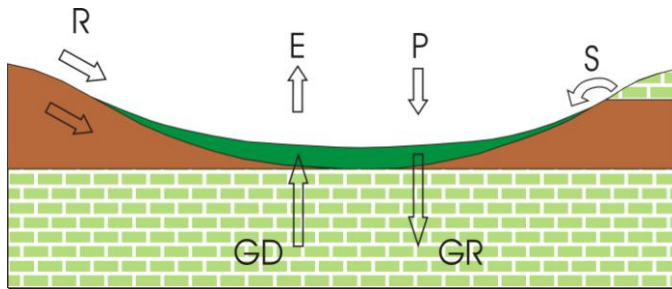


Zones humides de dépression
Alimentées par l'eau de surface : Zones humides reposant sur des couches imperméables. Apports dominés par les précipitations, le ruissellement de surface et éventuellement les sources. Pertes par évaporation seulement.



Zones humides de dépression

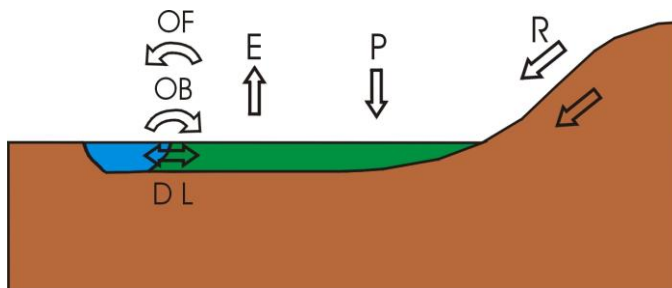
Alimentées par des eaux de surface et souterraines : Zones humides séparées de l'aquifère sous-jacent par des couches moins perméables. Apport par écoulement des eaux souterraines, lorsque le niveau de la nappe est élevé, précipitations, ruissellement de surface et peut-être sources. L'apport d'eau souterraine peut être restreint par des couches moins perméables. Pertes par évaporation et recharge des eaux souterraines lorsque le niveau de la nappe est faible.



Zones humides de dépression

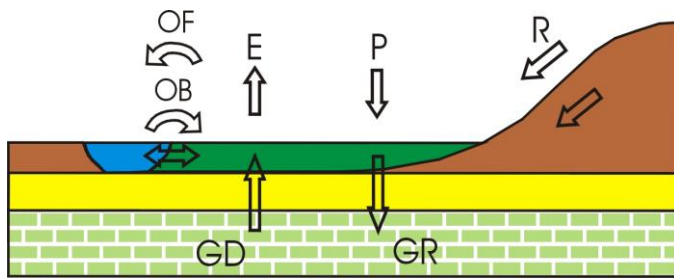
Alimentées par des eaux souterraines : Zones humides en contact direct avec l'aquifère sous-jacent. Apports dominés par l'écoulement des eaux souterraines lorsque le niveau de la nappe est élevé, complétés par les précipitations, le ruissellement de surface et les sources. Pertes par évaporation et recharge des eaux souterraines lorsque le niveau de la nappe est bas.

Figure A2.4. Zones humides de dépression



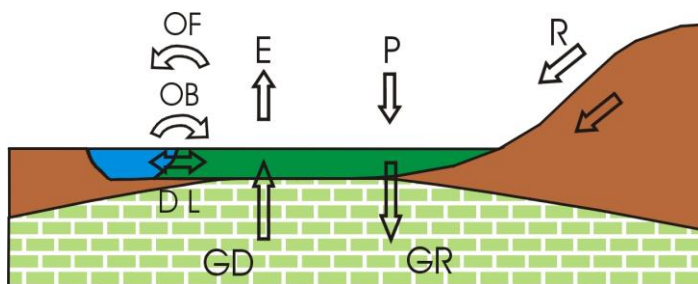
Zones humides de fond de vallée

Alimentées par l'eau de surface : Zones humides reposant sur des couches imperméables. Apports dominés par le débordement et le flux latéral, complétés par les précipitations et le ruissellement de surface. Pertes par drainage, écoulement de surface et évaporation. Flux d'entrée et sortie largement contrôlés par le niveau d'eau de la rivière ou du lac. Exemple : plaines d'inondation alluviales



Zones humides de fond de vallée

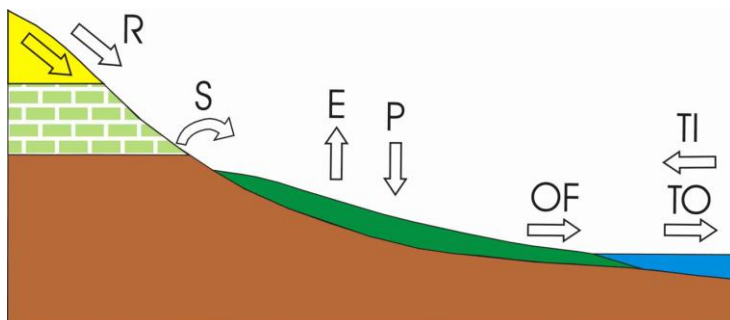
Alimentées par des eaux de surface et souterraines : Zones humides séparées de l'aquifère sous-jacent par des couches moins perméables. Apports par débordement et écoulement des eaux souterraines, complétés par le ruissellement et les précipitations. Le flux des eaux souterraines peut être restreint par la présence d'une couche intercalée peu perméable. Pertes par drainage, écoulement de surface, évaporation et recharge des eaux souterraines. Exemple : plaines d'inondation sur substrat sableux



Zones humides de fond de vallée

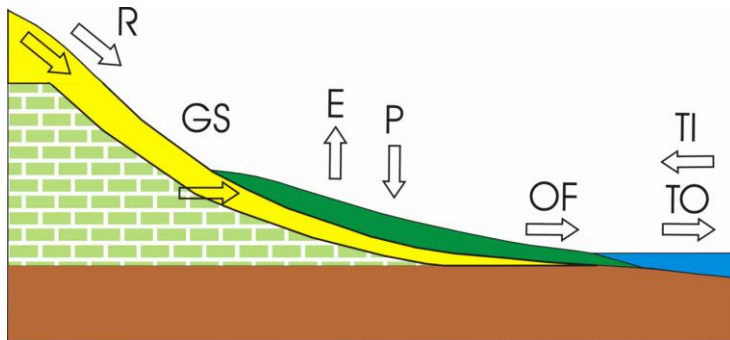
Alimentées par des eaux souterraines : Zones humides en contact direct avec l'aquifère sous-jacent. Apports dominés par le débordement et l'écoulement des eaux souterraines, lorsque le niveau de la nappe souterraine est élevé, complétés par le ruissellement et les précipitations. Pertes par recharge des eaux souterraines lorsque le niveau de la nappe phréatique est bas, drainage, écoulement de surface et évaporation. Exemple : plaines d'inondation de systèmes karstiques

Figure A2.5. Zones humides de fond de vallée



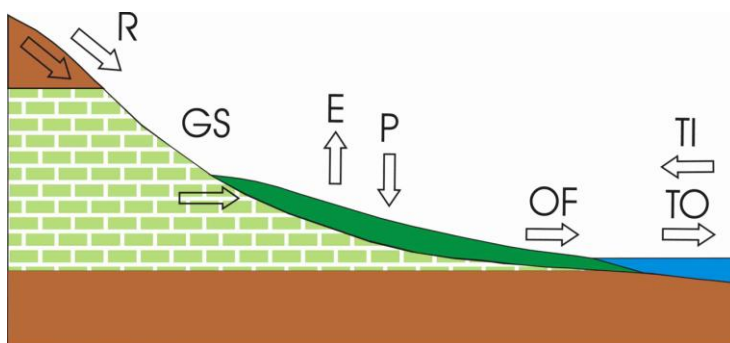
Zones humides côtières

Alimentées par l'eau de surface : Zones humides reposant sur des couches imperméables. Apports dominés par flux de marée, précipitations, ruissellement de surface et éventuellement sources. Pertes par évaporation et écoulement de surface



Zones humides côtières

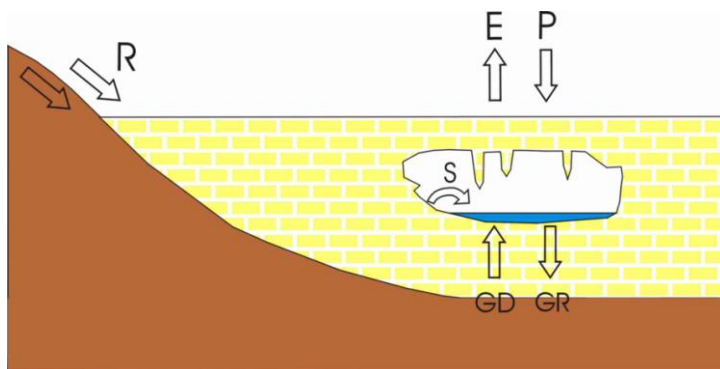
Alimentées par des eaux de surface et souterraines : Zones humides séparées de l'aquifère sous-jacent par des couches moins perméables. Apports dominés par flux de marée, infiltration d'eau souterraine, précipitations et ruissellement de surface. L'apport d'eau souterraine peut être restreint par des couches moins perméables. Pertes par évaporation et écoulement de surface.



Zones humides côtières

Alimentées par les eaux souterraines : Zones humides en contact direct avec l'aquifère sous-jacent. Apports dominés par infiltration d'eau souterraine et flux de marée, complétés par précipitations et ruissellement de surface. Pertes par évaporation et écoulement de surface.

Figure A2.6. Zones humides côtières



Zones humides souterraines

Alimentées par les eaux souterraines : Zones humides formées par des grottes de dissolution dans des roches perméables. Apport dominé par les sources et l'écoulement des eaux souterraines. Pertes par recharge des eaux souterraines.

Figure A2.7. Zones humides souterraines

Annexe 3

Exemple de bilan hydrique

À Sheringham et Beeston Regis Commons, R.-U., on considère que les principaux apports hydrologiques à la zone humide sont les pluies (P), le débit d'un cours d'eau qui traverse le site (R) et l'écoulement de l'aquifère de sable et de gravier ($GD_{s\&g}$). Il se pourrait aussi que de petites quantités d'eau pénètrent dans la zone humide en provenance de l'aquifère crayeux (GD_{Craie}), bien qu'initialement, ces volumes aient été considérés comme négligeables. Les principales pertes sont l'évaporation (E) et l'écoulement vers le ruisseau (OF). On pensait également que le changement de stockage d'eau dans la zone humide était négligeable. Le bilan hydrique utilisé se présente comme suit :

$$\begin{array}{lcl} \text{(précipitations nettes (P-E) + apport du cours d'eau (R) + } GD_{s\&g} + GD_{Craie}) = \text{(écoulement vers le cours} \\ \text{d'eau (OF))} & \text{[A3.1]} & \\ \text{flux d'entrée} & & \text{flux de sortie} \end{array}$$

Dans les conditions actuelles (avec l'exploitation des eaux souterraines de l'aquifère crayeux), le bilan hydrique annuel moyen est de (Ml/d):

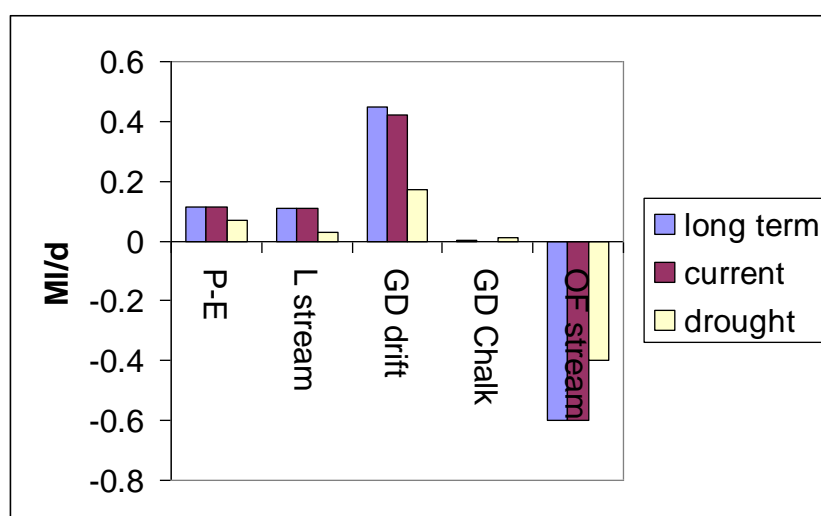
$$\begin{array}{lcl} (0,112 + 0,110 + 0,423 + 0,0) = (0,6) & & \text{[A3.2]} \\ \text{flux d'entrée} & & \text{flux de sortie} \end{array}$$

Le résidu obtenu de 0,045 Ml/d (tableau A3.1) est très réduit par rapport au volume des flux d'entrée et de sortie. Cela pourrait être imputable aux erreurs d'estimation de chaque composante ou à une augmentation du stockage d'eau dans la zone humide, mais aucune donnée ne permet de le vérifier. Le bilan hydrique a confirmé que l'écoulement des eaux souterraines de l'aquifère crayeux était négligeable dans les conditions actuelles.

On a également calculé les équilibres hydrologiques pour les conditions naturelles moyennes à long terme et les périodes de sécheresse (figure A3.1). L'écoulement de l'aquifère crayeux représente 1% des apports totaux dans des conditions normales, mais 4% en période de sécheresse. Les précipitations nettes (P-E) représentent 25% de l'apport total en conditions de sécheresse, comparé à 17% seulement dans des conditions moyennes normales. Par conséquent, les années de sécheresse, l'aquifère crayeux et les précipitations nettes jouent un rôle plus important dans le bilan hydrique, qui change en fonction des conditions climatiques. Cela nous a aidés à comprendre que la relation entre la zone humide et les eaux souterraines associées peut servir à élaborer un plan d'exploitation de l'eau mieux adapté aux besoins en eau de la zone humide dans différentes conditions climatiques.

Tableau A3.1. Bilan hydrique pour Sheringham et Beeston Regis Commons, R.-U.

	Mécanisme	Long terme	Actuel	Sécheresse
Entrées	P-E	0,112	0,112	0,070
	R cours d'eau	0,110	0,110	0,030
	GDs&g écoulement	0,450	0,423	0,170
	GD craie	0,003	0	0,010
	Entrées totales	0,675	0,645	0,280
Sorties	OF écoulement vers cours d'eau	-0,600	-0,600	-0,400
Résidus		0,075	0,045	-0,120



P-E

R cours d'eau

GDs&g écoulement

GDcraie

OF écoulement vers cours d'eau

Long terme

Actuel

Sécheresse

Figure A3.1. Représentation graphique des équilibres hydrologiques pour Sheringham et Beeston Regis Commons, R.-U.

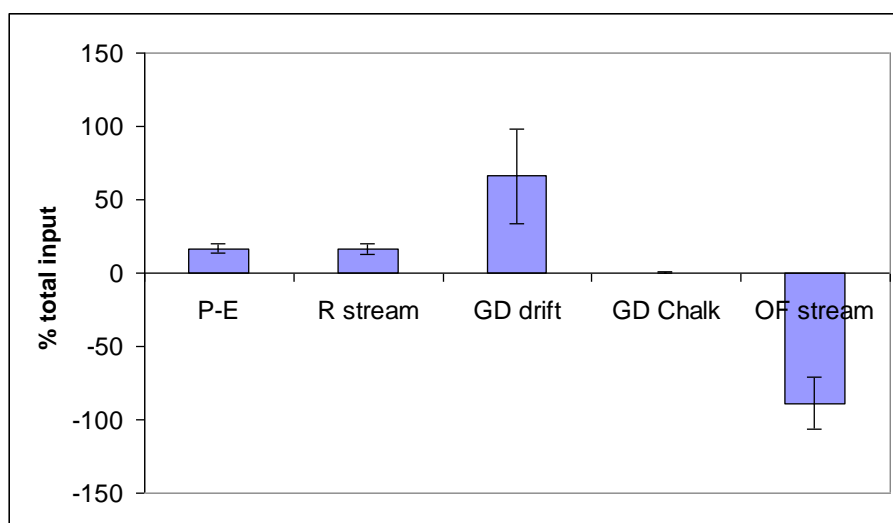
Dans le tableau A3.2, des estimations fictives de l'incertitude ont été ajoutées aux données de Sheringham et Beeston Regis Commons, R.-U., pour chaque mécanisme de transfert d'eau, pour illustrer comment cela peut modifier le bilan hydrique. Des estimations haute et basse ont été

établies en ajoutant et en soustrayant la marge d'incertitude. Les résultats sont présentés graphiquement à la figure A3.2. On dispose ainsi de trois scénarios de bilan hydrique pour la zone humide. L'incertitude globale est considérée comme satisfaisante car elle reste dans les limites de la marge d'erreur des estimations individuelles.

Il est essentiel de reconnaître qu'un bilan hydrique ne peut pas être utilisé pour prouver catégoriquement l'existence et l'ampleur précise des mécanismes de transfert d'eau. En revanche, le bilan hydrique est utilisé pour corriger les erreurs de compréhension et identifier les lacunes. Si les entrées et sorties ne s'équilibrent pas, la compréhension de l'hydrologie de la zone humide est évidemment insuffisante. Si les entrées et sorties s'équilibrent, la compréhension actuelle constitue une explication probable du mode de fonctionnement hydrologique de la zone humide.

Tableau A3.2. Inclure l'incertitude dans les données d'un bilan hydrique

	Mécanisme	long terme	incertitude	estimation supérieure	estimation inférieure
Entrées	P-E	0,112	20%	0,134	0,090
	R cours d'eau	0,11	25%	0,138	0,083
	GDs&g écoulement	0,45	50%	0,675	0,225
	GD craie	0,003	100%	0,006	0,000
	Entrées totales	0,675		0,953	0,397
Sorties	OF écoulement vers cours d'eau	-0,6	20%	-0,720	-0,480
Résidus		0,075		0,233	-0,083



% entrées totales

P-E

R cours d'eau

GDs&g écoulement

GDcraie

OF écoulement vers cours d'eau

Figure A3.2. Estimations hypothétiques d'incertitude ajoutées à un bilan hydrique