



HAL
open science

Services écosystémiques et solutions fondées sur la nature : quelle place pour les eaux souterraines et pour les hydrogéologues ?

Cécile Hérivaux, Jean-Christophe Maréchal

► To cite this version:

Cécile Hérivaux, Jean-Christophe Maréchal. Services écosystémiques et solutions fondées sur la nature : quelle place pour les eaux souterraines et pour les hydrogéologues ?. Géologues, 2020. hal-03401492

HAL Id: hal-03401492

<https://brgm.hal.science/hal-03401492>

Submitted on 25 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Services écosystémiques et solutions fondées sur la nature : quelle place pour les eaux souterraines et pour les hydrogéologues ?

Cécile Hérivaux¹ et Jean-Christophe Maréchal²

Les aquifères jouent un rôle important pour la fourniture de plusieurs services aux activités humaines. Ils sont pourtant pour le moment peu pris en compte dans les démarches d'évaluation de services écosystémiques, et de conception des solutions fondées sur la nature. Cet article propose un cadre conceptuel permettant d'articuler aquifères, services écosystémiques et solutions fondées sur la nature, et questionne la place de l'hydrogéologue dans ces démarches.

Introduction

Les travaux sur les services écosystémiques se sont multipliés ces quinze dernières années. Suite au Millenium Ecosystem Assessment (MA, 2005), vaste étude conduite de 2000 à 2005 sous l'égide de l'ONU par près de 1400 scientifiques dans 95 pays, l'Europe s'est engagée à réaliser une cartographie et une évaluation de ses écosystèmes (programme Mapping and assessment of ecosystems and their services). La France, au travers du programme Evaluation Française des Ecosystèmes et Services Ecosystémiques (EFESE), participe à ce projet européen avec des contributions scientifiques et techniques qui concernent tout le territoire métropolitain et l'Outremer. Les biens et services écosystémiques sont définis comme des avantages socio-économiques tirés par l'homme de son utilisation durable des fonctions écologiques des écosystèmes. Dans cette lignée, le concept de solutions fondées sur la nature (SFN) s'est développé depuis une dizaine d'années, porté par l'UICN, pour répondre à différents défis sociétaux, tels que la sécurité de l'approvisionnement en eau (Cohen-Shacham et al., 2016), tout en produisant des bénéfices pour la biodiversité. Les SFN sont des solutions complémentaires aux solutions d'ingénierie classique, et se déclinent en trois types d'actions : (i) la préservation d'écosystèmes fonctionnels et en bon état écologique ; (ii) l'amélioration de la gestion d'écosystèmes pour une utilisation durable par les activités humaines ; (iii) la restauration d'écosystèmes dégradés ou la création d'écosystèmes.

Ces deux concepts ont en commun de considérer que des écosystèmes en bonne santé peuvent fournir de multiples bénéfices : aussi bien des services importants pour le bien-être humain, que pour l'atteinte d'objectifs économiques, sociaux et environnementaux tels que l'adaptation au changement climatique. D'abord réservés à la recherche, ces concepts percolent de plus en plus dans la sphère opérationnelle en s'inscrivant dans la planification et la mise en œuvre de plusieurs politiques publiques, comme en témoigne leur inscription dans les plans nationaux sur la biodiversité et l'adaptation au changement climatique, les 11^{èmes} programmes des agences de l'eau, afin de répondre aux engagements internationaux de la France dans le cadre de la convention pour la diversité biologique, les objectifs d'Aïchi et des objectifs de développement durable. Ces concepts ont largement été utilisés dans le domaine de la gestion de l'eau, principalement pour les écosystèmes aquatiques de surface (cours d'eau, zones humides, ...).

Toutefois, à l'exception de quelques travaux de recherche (Griebler and Avramov, 2014; Qiu et al., 2019; Tuinstra and Wensem, 2014), les aquifères ne sont en général pas considérés dans les travaux de conception des SFN et d'évaluation des services écosystémiques. Un projet réalisé en partenariat entre le BRGM et l'Office Français de la Biodiversité (Hérivaux and Maréchal, 2019) a ainsi mis en évidence

1 BRGM, Univ. Montpellier, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier, France – c.herivaux@brgm.fr

2 BRGM, Univ. Montpellier, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier, France – jc.marechal@brgm.fr

que les évaluations menées par l'EFESE s'arrêtent à la contribution des écosystèmes de surface, sans considérer le rôle potentiel des aquifères ni leur extension géographique. L'« oubli » des aquifères dans les démarches d'évaluation de services écosystémiques peut avoir plusieurs conséquences : d'une part une mauvaise évaluation des niveaux de services écosystémiques, lorsqu'ils sont *in fine* dépendant des aquifères, d'autre part un faible niveau de protection des eaux souterraines lors de la conception et des choix de politiques publiques environnementales si ceux-ci reposent sur les démarches d'évaluation des services ne considérant pas ces ressources. Ceci est d'autant plus important dans le contexte du changement climatique et de la pression qu'il va exercer sur les ressources en eau.

En réponse à ce constat, cet article introduit la notion de services dépendant des aquifères. Il propose un cadre conceptuel permettant d'articuler aquifères, écosystèmes, services écosystémiques et solutions fondées sur la nature, puis ouvre sur les apports potentiels de l'hydrogéologie.

Les aquifères : des écosystèmes pas comme les autres...

Plusieurs raisons peuvent expliquer l'absence de prise en compte des aquifères dans ces évaluations : leur localisation souterraine, qui les rend invisibles, difficiles à représenter sur une carte avec d'autres écosystèmes à moins d'en concevoir une représentation tridimensionnelle, leur connexion avec différents écosystèmes de surface, la méconnaissance de leur composante biotique, leur diversité et la complexité de leur fonctionnement.

Un aquifère désigne une entité géologique dont les caractéristiques sont favorables au stockage et à la circulation de l'eau souterraine. La nappe aquifère désigne quant à elle l'ensemble de la roche aquifère et de l'eau souterraine qu'elle contient. On distingue classiquement les nappes libres des nappes captives. La configuration classique d'une nappe aquifère libre est illustrée dans la Figure 1 qui constituera le schéma directeur de notre réflexion. Une partie de l'eau de pluie s'infiltré au travers du sol et s'écoule verticalement en saturant progressivement le sous-sol jusqu'à ce qu'elle rencontre une roche imperméable : ce flux d'eau constitue la recharge naturelle (Wuilleumier et al. [7]). Verticalement, on distingue alors deux zones : la zone non saturée dans laquelle les vides souterrains sont remplis d'air et d'eau et la zone saturée (la nappe) dans laquelle ces vides sont totalement remplis d'eau. Au fur et à mesure que l'aquifère se remplit d'eau, le niveau piézométrique de la nappe monte et induit des circulations (lignes d'écoulement sur la Figure 1) des potentiels hydrauliques élevés vers les potentiels faibles (de la gauche vers la droite sur la figure). L'eau souterraine est donc en mouvement comme l'eau en général au sein du cycle de l'eau. Horizontalement, on distingue alors deux zones : la zone de recharge dans laquelle l'eau s'infiltré et recharge l'aquifère et la zone d'exutoire où l'eau souterraine retrouve la surface et alimente le réseau hydrographique. La somme de ces deux zones correspond au bassin hydrogéologique. De ce fait, les aquifères peuvent mettre en connexion différents écosystèmes de surface via les écoulements souterrains, depuis les écosystèmes amont situés dans la zone de recharge, aux écosystèmes dépendant des eaux souterraines situés dans la zone exutoire en aval.

Bien qu'ils ne soient pas toujours considérés comme des écosystèmes, les aquifères ont également une composante biotique : ils constituent des habitats pour une microfaune, qui contribue notamment à dégrader un certain nombre de contaminants (Griebler et Avramov, 2014). Cette biodiversité est relativement peu considérée dans les évaluations nationales et européennes. L'état écologique des eaux souterraines ne fait par exemple pas partie des indicateurs de suivi demandés par la Directive Cadre sur l'Eau ; seuls les états quantitatif et chimique sont pris en considération.

Il existe une grande diversité d'aquifères, liée à la géologie, depuis les bassins sédimentaires, les plaines alluviales, les roches calcaires et les roches cristallines. Cette diversité se traduit par des vitesses de circulation de l'eau souterraine très variables, dépendant de la perméabilité de l'aquifère et de sa géométrie. Pour parcourir un kilomètre, l'eau souterraine peut prendre plus d'un an (voire beaucoup plus) dans un aquifère poreux, quelques mois ou semaines dans un aquifère fracturé et quelques heures

dans un aquifère karstique. Le pouvoir auto-épurateur de l'aquifère est d'autant moins élevé que les vitesses sont élevées.

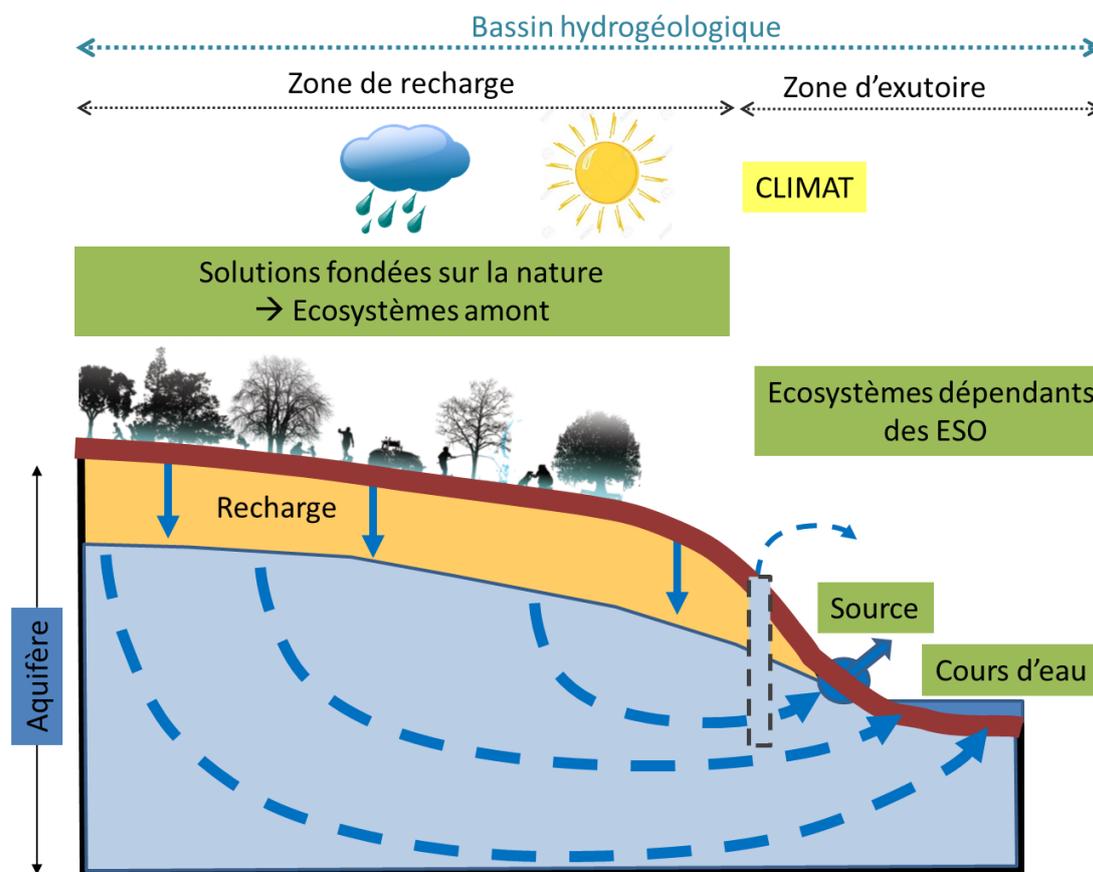


Figure 1. Coupe schématique d'une nappe aquifère libre avec mise en évidence des écoulements souterrains entre la zone de recharge et la zone d'exutoire

Certains services écosystémiques dépendent fortement des aquifères

En France, le volume d'eau souterraine est estimé à 2000 milliards de m³. Ces stocks d'eau souterraine ne sont pas répartis uniformément sur le territoire et peuvent varier fortement selon les saisons. Chaque année, environ 5 % de ces 2 000 milliards de m³, soit 100 milliards de m³/an, s'écoulent vers les sources et les cours d'eau, tandis que près de 6 milliards de m³/an sont prélevés pour les activités humaines, soit 0,3% du volume total des eaux souterraines chaque année. De par leur rôle clé dans le cycle de l'eau, les aquifères contribuent à la fourniture de plusieurs services aux activités humaines, en particulier le stockage et la production naturelle d'eau de qualité, l'alimentation en eau des milieux aquatiques associés (zones humides, zones de résurgences le long de cours d'eau), et la régulation des inondations. Selon les contextes, ils peuvent également jouer un rôle d'assurance non négligeable contre les risques de sécheresse et de pollution pour l'approvisionnement en eau futur. Nous qualifions ces services de « services dépendant des aquifères » : ils résultent des interactions entre les écosystèmes de surface et les aquifères (Fister et Marguet [10]). Du fait de la grande diversité des types d'aquifères présents sur le territoire, les niveaux de ces services sont très variables spatialement.

Le stockage et la production naturelle d'eau de qualité

En 2013, les prélèvements d'eau souterraine couvraient environ 68% des besoins domestiques, 37% des besoins agricoles d'eau d'irrigation et 38% des besoins industriels (prélèvements des centrales

nucléaires non compris). Ces proportions sont très variables selon les territoires.

La qualité des ressources en eau souterraine est généralement supérieure à celle des eaux de surface. Le long temps de transit des eaux souterraines au sein des aquifères est accompagné de phénomènes de dispersion, diffusion, adsorption et dégradation des éventuels polluants (en partie par l'activité microbienne qui dégrade les composants organiques et éliminent ainsi certains polluants de même que les germes pathogènes). Les aquifères jouent alors le rôle d'infrastructures (naturelles) de potabilisation, remplaçant des infrastructures artificielles qui auraient été nécessaires pour traiter de l'eau de surface (floculation, décantation, désinfection...) pour certains usages sensibles à la qualité tels que la production d'eau potable. Ce pouvoir auto-épurateur des aquifères est d'autant plus élevé que les temps de transit sont importants. Il est dès lors moins élevé dans les aquifères karstiques au sein desquels les temps de transit sont généralement courts (Lorette et al. [3]).

Les aquifères assurent également le rôle d'infrastructures de distribution d'eau sur des territoires parfois très importants. Ils remplacent ainsi des infrastructures artificielles de distribution d'eau (canaux et canalisation) que la société aurait dû construire et maintenir en absence d'eau souterraine (Nicoud et al. [13]). Les régions dépourvues de volume facilement exploitable d'eau souterraine comme la Provence par exemple ont ainsi dû développer d'importants réseaux de canaux et canalisations pour alimenter les zones agricoles et urbaines. L'importance de ce service est fonction de l'extension géographique de l'aquifère et de la nappe, et donc indirectement du linéaire de canalisation qu'elle permet d'éviter de construire pour desservir les populations.

L'alimentation en eau des écosystèmes de surface associés

Les aquifères ont également un rôle clé dans le cycle de l'eau via l'alimentation des cours d'eau et zones humides associées. Ce service est lié à leur capacité à réalimenter en eau les cours d'eau et les zones humides pendant la période d'étiage (très basses eaux). Les apports d'eau souterraine représentent l'essentiel des apports en eau pendant les périodes sans précipitation dans de nombreux cours d'eau et/ou zones humides situés dans la zone exutoire des nappes aquifères. Les eaux souterraines contribuent ainsi au bon fonctionnement des rivières en période d'étiage en permettant d'éviter la fragmentation des cours d'eau, l'élévation de la température, la modification de la qualité physico-chimique de l'eau, la modification de la végétation aquatique et l'assèchement des linéaires (Nowak and Michon, 2017). Cette réalimentation des cours d'eau est très dépendante de la configuration géologique, topographique et hydrologique, ainsi que des caractéristiques des cours d'eau et des zones humides. Du fait de leur proximité et relation évidente, ce sont les nappes alluviales qui contribuent le plus à l'alimentation en eau des écosystèmes aquatiques de surface et ce, de façon diffuse le long des cours d'eau. De par leur débit très élevé, les sources drainant les nappes karstiques contribuent également, de façon ponctuelle, à l'alimentation des eaux de surface (Fister et Marguet [10]). A l'inverse, les eaux de surface situées dans la zone de recharge des aquifères peuvent également contribuer à l'alimentation des eaux souterraines (Perault et al. [9]).

La régulation des inondations

Les aquifères contiennent, au sein de leur zone non saturée, un volume de stockage potentiel d'eau, particulièrement lorsque leur niveau piézométrique est bas. Du fait de circulations lentes au sein des nappes aquifères, l'eau qui s'infiltré vers les nappes durant un épisode de pluie intense, est momentanément « soustraite » de la partie superficielle du cycle de l'eau. Ce phénomène contribue à réduire le risque d'inondation. Il existe cependant deux exceptions à ce rôle de régulation des inondations. D'une part, le phénomène de remontée de nappe (Bessière et al. [2]), qui correspond à une augmentation du niveau de la nappe aquifère suite à l'infiltration de grandes quantités d'eau durant de longues périodes de pluie jusqu'à saturation totale du réservoir et débordement de la nappe, engendrant ainsi une inondation. Ce phénomène a surtout été observé dans les nappes de la craie du Bassin Parisien.

D'autre part, au sein des aquifères karstiques, la rapide mise en charge des réseaux de chenaux karstiques et les écoulements rapides qui en résultent s'additionnent aux écoulements de surface une fois que le réservoir karstique est saturé. Cela engendre une crue karstique avec une dynamique très rapide (crue éclair) : ce type de phénomène est essentiellement rencontré dans le Sud de la France avec notamment les épisodes cévenols. A l'inverse, la gestion active des aquifères karstiques peut contribuer à diminuer le risque inondation en pompant à l'amont d'une source durant la saison sèche des volumes d'eau supérieurs à l'écoulement naturel de la source. On réduit ainsi les niveaux d'eau au sein de l'aquifère, ce qui contribue à augmenter la capacité de rétention du bassin karstique lorsque vient la pluie.

L'assurance contre les risques de sécheresse et de pollution

Selon les contextes, la présence de ressources en eaux souterraines bien préservées peut jouer un rôle d'assurance non négligeable en contexte de sécheresse, mais également en cas de dégradation progressive de la qualité des ressources en eau superficielles.

- Les aquifères contiennent un stock d'eau d'importance variable. Lorsque ce stock est important, il peut permettre de répondre aux besoins humains pendant une période de sécheresse, jouant ainsi le rôle d'une infrastructure de stockage et donc d'assurance contre le risque de sécheresse (Allier et al. [1] ; Gaillard et al. [11] ; Monbertrand et Dubois [12]). Ce rôle d'assurance est toutefois très variable d'un aquifère à l'autre (Bault et Laurencelle [5]: il dépend du volume d'eau stockée, de la connectivité de la nappe considérée avec les masses d'eau superficielles ou encore de son taux de renouvellement annuel (rapport flux / stock).
- Les aquifères peuvent protéger plus ou moins l'eau souterraine qu'ils contiennent des pollutions accidentelles de surface. Le niveau de protection varie selon les aquifères, et en particulier selon leurs caractéristiques géologiques (type de sol, épaisseur et caractéristiques de la zone non saturée) qui déterminent ce que les hydrogéologues appellent leur vulnérabilité intrinsèque (Lorette et al. [3]).
- La préservation de ressources en eau souterraine de bonne qualité peut également jouer un rôle de sécurisation sur le long terme face à différents types de stress (augmentation des besoins liés à la démographie, dégradation de la qualité des ressources en eau par exemple). En France, les zones de sauvegarde pour le futur (ZSF) pour l'alimentation en eau potable (AEP) visent, entre autres, à assurer ce rôle de sécurisation. Les nappes aquifères qui peuvent jouer ce rôle sont des ressources de bonne qualité, importantes en quantité, et bien situées par rapport aux zones de consommation actuelle ou future.

Les SFN jouent un rôle potentiellement important pour la préservation de ces services.

La qualité et la durabilité de ces services sont directement menacées par la dégradation de l'état chimique, quantitatif et thermique des nappes. La mise en œuvre de plans de gestion adaptés des eaux souterraines est souvent nécessaire pour préserver leur état, et ainsi assurer la durabilité des services rendus à la société. Les SFN jouent un rôle potentiellement important dans la gestion durable des eaux souterraines. L'intérêt des SFN pour protéger la qualité des eaux souterraines n'est plus à démontrer (rôle des couverts forestiers et des prairies de fauche en gestion extensive pour protéger les captages d'eau potable par exemple). Plus récemment, les SFN sont également envisagées pour améliorer la gestion quantitative des aquifères, en favorisant l'infiltration des eaux pluviales (Cadilhac et al. [8]) - depuis des solutions de recharge naturelle jusqu'aux solutions plus techniques de gestion active ou de recharge artificielle (Pettenati and Dörfliger, 2019). Ainsi, la préservation et/ou la restauration des écosystèmes amont peuvent permettre de conserver voire d'améliorer plusieurs services dépendant des aquifères (Hérivaux and Maréchal, 2019) tels que le stockage et la production naturelle d'eau de qualité, l'alimentation en eau des écosystèmes de surface associés, et la régulation des inondations (Fig. 1). Les SFN peuvent délivrer une diversité de services sur les territoires où elles sont mises en œuvre : d'une part ceux qui sont liés à l'amélioration/ la préservation des services dépendant des eaux souterraines (plutôt dans la zone avale de la Figure 1), et d'autre part ceux qui sont directement liés aux SFN (plutôt

dans la zone amont de la Figure 1). En effet, au-delà des services dépendant des aquifères, les SFN peuvent directement contribuer à générer une diversité de bénéfices sur les territoires sur lesquels elles sont mises en œuvre : la lutte contre le changement climatique, l'amélioration de la qualité de l'air, l'amélioration de la qualité de l'eau, la réduction des îlots de chaleurs urbains par exemple. Des travaux récents ont ainsi montré que l'identification et l'évaluation de la diversité des services écosystémiques associés à la préservation des écosystèmes situés sur les Zones de Sauvegarde pour le Futur peuvent être un levier pour favoriser la protection des eaux souterraines (Hérivaux and Grémont, 2019).

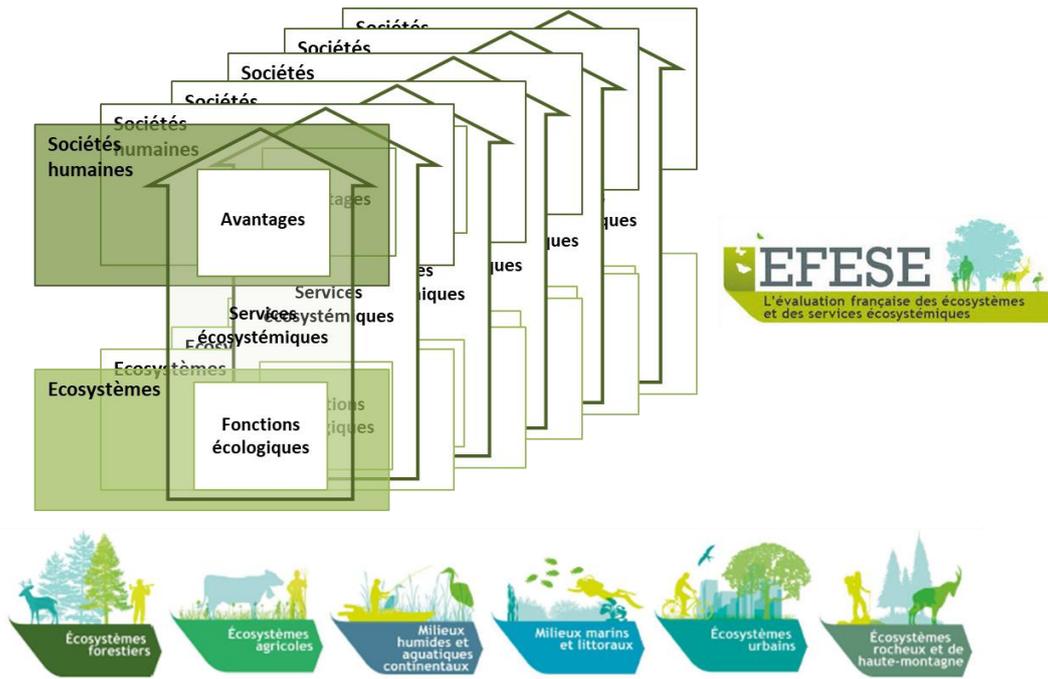
Proposition d'un cadre conceptuel

D'une approche mono-écosystème à une approche intégrant les aquifères

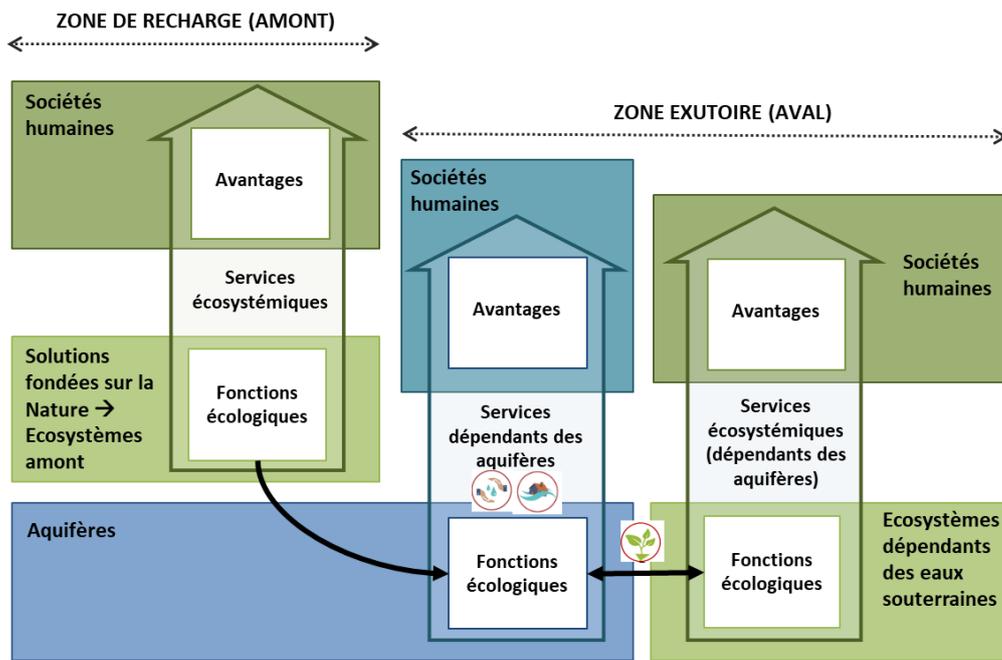
Pour pallier l'absence des aquifères dans les travaux d'évaluation des services écosystémiques, nos travaux ont permis de proposer une évolution du cadre conceptuel d'évaluation proposé par EFESSE (avec une approche mono-écosystème) vers un schéma conceptuel permettant d'articuler écosystèmes, aquifères, et services dépendant des aquifères (Fig. 2). Ce schéma conceptuel s'inspire de Brauman (2015; 2007), Keeler et al. (2012) et Guswa (2014). Il reprend la représentation classique des services écosystémiques à l'interface entre écosystèmes et sociétés humaines de la Figure 2a qu'il intègre dans la conceptualisation des flux d'eau et de matière d'un aquifère entre la zone amont et la zone aval telle qu'illustrée à la Figure 1.

Il explicite les liens potentiels entre les écosystèmes terrestres et aquatiques (cadres verts) et les aquifères (cadres bleus). Les SFN, via la préservation et la restauration des écosystèmes, influencent les aquifères dans la zone de recharge. Inversement, les aquifères peuvent influencer certains types d'écosystèmes terrestres et aquatiques situés dans la zone d'exutoire. Les aquifères sont ainsi en interaction avec les écosystèmes de l'amont et les écosystèmes dépendant des eaux souterraines, via des échanges de flux d'eau et de matière.

Les écosystèmes fournissent une diversité de services qui ont été étudiés dans les travaux EFESSE. Parmi ceux-ci, certains ne dépendent pas uniquement des écosystèmes terrestres, mais également des aquifères. C'est le cas du stockage et de la production d'eau de bonne qualité, de l'alimentation en eau des écosystèmes de surface associés, de la régulation des inondations. Ainsi, le stockage et la production d'eau naturelle de qualité et la régulation des inondations résultent des avantages socio-économiques retirés par la société de son utilisation durable des fonctions écologiques des écosystèmes de l'amont et des aquifères. L'alimentation en eau des écosystèmes de surface associés résulte des avantages socio-économiques retirés par la société de son utilisation durable des fonctions écologiques des écosystèmes de l'amont, des aquifères et des écosystèmes dépendant des nappes aquifères.



(a)



-  Stockage et production naturelle d'eau de qualité
-  Alimentation en eau des écosystèmes de surface associés
-  Régulation des inondations
-  Flux d'eau et de matière

(b)

Figure 2. D'une approche mono-écosystème (a) à une approche intégrant les aquifères (b)

Attributs hydrologiques versus attributs hydrogéologiques

Une représentation plus détaillée du schéma conceptuel de la Figure 2 permet de distinguer les attributs hydrologiques des attributs hydrogéologiques (Fig. 3). Les attributs hydrologiques, tels que le taux de recharge et la concentration en polluants des eaux d'infiltration, décrivent la manière dont les écosystèmes influencent les aquifères, et varient dans le temps et dans l'espace. L'eau se retrouve ensuite dans le milieu saturé, dans des aquifères, qui peuvent présenter des caractéristiques très diversifiées (étendue spatiale, profondeur, inertie, épaisseur, géologie, type de porosité et/ou perméabilité, géochimie et microbiologie, aquifère libre ou captif...). De même que les écosystèmes terrestres fonctionnent selon des processus écohydrologiques qui leur sont propres, les aquifères fonctionnent selon des processus physiques et bio-géochimiques qui diffèrent selon leurs caractéristiques. Le niveau de services délivrés *in fine* est fonction des caractéristiques des eaux souterraines dans la zone aval, que nous appelons ici attributs hydrogéologiques : la quantité (niveau piézométrique, volume de la ressource, débit à l'exutoire d'une source), la qualité (concentration en polluants, salinité) et leur variation dans le temps et dans l'espace. Les attributs hydrogéologiques sont eux-mêmes influencés par des interactions complexes entre le climat, la topographie, la géologie, l'occupation des sols, les pratiques et autres interventions humaines dans le paysage.

Une pratique courante dans les évaluations consiste à caractériser les services dépendant des aquifères à partir des attributs hydrologiques uniquement, en faisant l'hypothèse implicite que le niveau de service a une relation linéaire positive avec ce type d'attribut. Cela revient par exemple à caractériser le niveau de service régulation de la quantité par l'indicateur taux de recharge, et le niveau de service régulation de la qualité de l'eau par l'indicateur concentration en polluants dans les eaux d'infiltration. Ces indicateurs reflètent effectivement la contribution des écosystèmes aux services, mais ne permettent pas de caractériser complètement les services dépendant des aquifères car ils occultent l'impact des processus physiques et biogéochimiques au sein des aquifères.

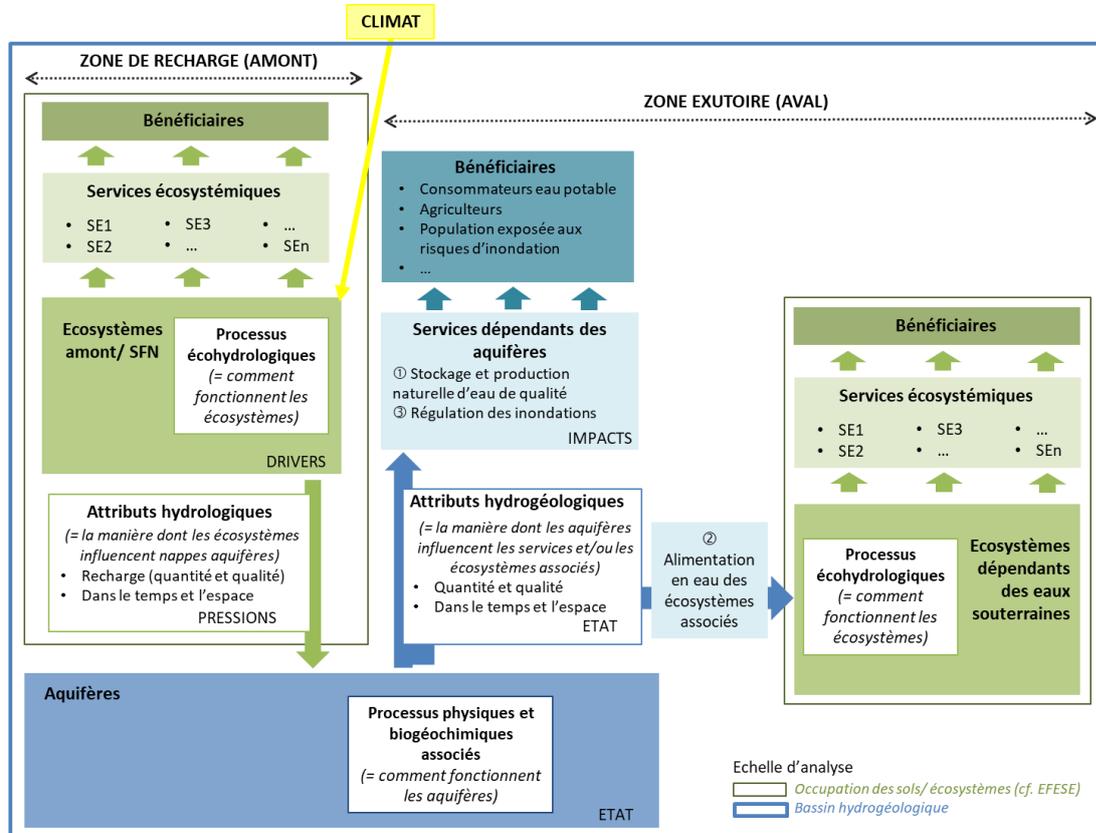


Figure 3. Schéma conceptuel articulant aquifères, écosystèmes, SE et SFN

Liens entre les attributs hydrogéologiques et le niveau de services

Les niveaux de services dépendant des aquifères sont en général fonction de deux types d'attributs hydrogéologiques : la quantité et la qualité de l'eau souterraine, et leur distribution dans le temps et dans l'espace. La caractérisation de ces attributs hydrogéologiques est une étape importante pour caractériser les services dépendant des aquifères. Ils peuvent constituer les variables d'entrée des évaluations de l'effet d'une variation de service sur le bien-être de la population. A chaque service peuvent être associés des bénéficiaires : les consommateurs d'eau potable et les irrigants pour le service de stockage et de production d'eau ; la population exposée aux inondations pour le service de régulation des inondations ; les usagers des écosystèmes aquatiques dépendant des eaux souterraines pour le service alimentation en eau des écosystèmes de surface associés...

Prenons l'exemple du service de stockage et de production naturelle d'eau pour l'alimentation en eau potable. Le niveau de service est directement dépendant de la quantité d'eau disponible à un instant t au point de captage (une augmentation de cet attribut est en général favorable), et de sa qualité (une mauvaise qualité peut impliquer la nécessité de mettre en place des traitements coûteux; voire la suspension de son exploitation et donc réduire le niveau de service). La répartition dans l'espace de l'eau disponible est également un facteur important: l'eau n'est utile que si les usagers y ont accès ; de même que sa répartition dans le temps : le niveau de service ne peut en général être correctement décrit par des volumes d'eau moyen ou annuel, le niveau de service est fonction de la disponibilité en eau tout au long de l'année, en particulier pendant les périodes de besoins de pointe dans le cas des territoires avec un fort afflux saisonnier de population touristique. De la même manière, si l'eau est utilisée pour l'irrigation des cultures, le niveau de service est directement lié à la disponibilité de l'eau pendant les périodes où les cultures en ont besoin.

Dans le cas du service de régulation des inondations, dans un contexte d'aquifères karstiques, le niveau de service dépend directement du niveau de remplissage de l'aquifère et du débit des sources en cas de débordement, mais assez peu de la qualité de l'eau. La distribution dans l'espace est particulièrement importante, puisque les précipitations ne sont pas réparties uniformément à l'échelle d'un bassin versant, et que l'eau n'a un impact négatif que lorsqu'elle se concentre au même endroit, inondant les cultures ou les maisons. Enfin, la dimension temporelle est également importante. Les précipitations ne se répartissent pas uniformément au cours de l'année. Dans les régions méditerranéennes par exemple, les fortes pluies se concentrent plutôt à l'automne. Un faible niveau piézométrique des nappes en période automnale peut contribuer à améliorer le service de régulation des inondations, à condition que la capacité du sol ne soit pas saturée et qu'il n'y ait pas un refus à l'infiltration.

La dimension intégrative des aquifères

Ce schéma illustre également le fait que les aquifères sont intégrateurs d'un ensemble d'occupations du sol et d'écosystèmes. Les niveaux de services dépendant des aquifères sont la résultante (1) des types de combinaison des écosystèmes de l'amont et (2) du fonctionnement des aquifères. A l'inverse, dans le cas des services de type production de bois qui ne sont produits que par un type d'écosystème, les services liés à l'eau résultent de la combinaison de plusieurs écosystèmes. Tous les écosystèmes d'un bassin hydrogéologique ont un impact sur l'eau qui les traverse. Il est difficile dès lors de faire le lien entre un écosystème particulier et un niveau de service lié à l'eau. Une approche transversale à plusieurs écosystèmes est en conséquence nécessaire pour évaluer ce type de service.

Selon la taille du bassin hydrogéologique, il peut y avoir une distance importante entre les SFN et écosystèmes contributifs à la fourniture de services et les bénéficiaires de ces services. Ce décalage spatial est assez spécifique aux aquifères, et très lié à la structure géologique et au fonctionnement des aquifères. Beaucoup de services n'ont pas ce décalage spatial : les services récréatifs associés à une forêt, la production de bois... Cette distance peut être à l'origine de problématiques de gestion amont-aval. C'est par exemple le cas lorsque l'aire d'alimentation d'une ressource à préserver est localisée sur

des communes dont l'alimentation en eau potable ne dépend pas directement de cette ressource. La préservation de la ressource bénéficie dans ce cas à des populations éloignées tandis que les contraintes liées à la préservation sont subies par les populations locales.

Là encore, la prise en compte des aquifères est importante pour intégrer ce décalage spatial dans les évaluations des services stockage et production d'eau de qualité, soutien d'étiage et régulation des inondations. La seule prise en compte des SFN, des écosystèmes terrestres et des attributs hydrologiques ne permet pas d'évaluer les services à l'aval pour la population. En d'autres termes, la prise en compte des nappes aquifères et de leur fonctionnement est incontournable dès lors que l'on s'intéresse aux bénéficiaires des services.

La dimension temporelle

Comme évoqué plus haut, le temps de résidence de l'eau souterraine au sein d'un aquifère fluctue entre quelques heures ou jours dans les systèmes karstiques et des milliers d'années dans les grands bassins sédimentaires. Dans les systèmes karstiques, les circulations très rapides d'eau souterraine rendent ces aquifères très vulnérables aux pollutions. Par contre, une fois la pollution passée, dans la majorité des cas l'aquifère retrouve assez rapidement son état initial après quelques épisodes de pluie. Au contraire, la plus grande partie des aquifères des bassins sédimentaires est très éloignée temporellement des zones de recharge, les rendant ainsi très peu vulnérables aux pollutions actuelles. Enfin, les aquifères avec des temps de transit intermédiaires (de l'ordre de plusieurs dizaines d'années) ont pu voir leur qualité détériorée par les pratiques agricoles par exemple.

La prise en compte des aquifères est importante pour intégrer cette inertie. L'évaluation des services écosystémiques dépendant des aquifères doit, de ce fait, intégrer cette dimension temporelle. Les plans d'action mis en œuvre pour reconquérir la qualité de l'eau des captages d'eau potable dégradée par les pollutions diffuses d'origine agricole est un exemple de la nécessité de prendre en compte ce délai de réponse des aquifères dans les évaluations. Sur les territoires agricoles, la conversion de parcelles en prairie de fauche à gestion extensive peut avoir des effets très différents sur l'évolution de la qualité de l'eau de captage selon sa situation dans des aquifères différents, en termes de temps de réponse. La grande inertie de certains aquifères peut ralentir fortement l'impact bénéfique d'éventuels changements de pratiques agricoles sur les attributs hydrogéologiques au niveau du captage. Comprendre et anticiper ce délai permet de mieux concevoir les plans d'action à mettre en place, et éviter un sentiment de découragement collectif lorsque les effets escomptés sur la qualité de la nappe ne sont pas observés sur le court terme.

Quels apports de l'hydrogéologie ?

L'hydrogéologie est un maillon indispensable pour caractériser les différents services dépendant des aquifères : ① le stockage et la production naturelle d'eau de qualité, ② l'alimentation en eau des écosystèmes de surface associés, ③ la régulation des inondations, et ④ l'assurance contre les risques de sécheresse et de pollution. Les articles de ce numéro spécial illustrent la diversité des outils et méthodes pouvant être mobilisés en hydrogéologie, afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère, les attributs hydrologiques (e.g., recharge) et les attributs hydrogéologiques (e.g., qualité de la nappe, piézométrie, volume prélevable, contribution au débit d'étiage du cours d'eau) qui sont les variables clés de la compréhension des services dépendant des aquifères.

La recharge naturelle des nappes (Wuilleumier et al. [7]) constitue une composante essentielle du cycle de l'eau, attribut hydrologique dépendant des écosystèmes de l'amont et influant fortement sur le fonctionnement des nappes aquifères et leurs attributs hydrogéologiques (piézométrie et qualité). La diminution des précipitations et l'augmentation des températures du fait du changement climatique vont impacter le taux de recharge annuelle des nappes (Cadilhac et al. [8]). Ceux-ci vont modifier la

piézométrie moyenne des aquifères et les services aux écosystèmes de l'aval avec notamment une réduction du débit d'étiage des rivières et de la contribution de celles-ci à l'alimentation des zones humides... L'influence sera différente selon le type d'aquifère et sa sensibilité au changement climatique (Perault et al. [9]).

Les méthodes statistiques et de traitement du signal permettent de caractériser la sensibilité de la piézométrie d'un aquifère aux précipitations (Allier et al. [1] ; Baulon et al. [6] ; Gaillard et al. [11]) et en conséquence son potentiel rôle d'assurance contre la sécheresse. L'étude spatiale de la piézométrie est également au cœur de l'analyse du risque inondation par remontée de nappe et de la capacité de régulation de l'aquifère lors d'un épisode pluvieux (Bessière et al. [2]). Le bulletin de situation des nappes (Bault et Laurencelle [5]) permet de communiquer à destination des principaux acteurs et des utilisateurs de l'eau (agriculteurs, industriels, presse, grand public...) souhaitant connaître l'état quantitatif des eaux souterraines. Pour la prévision future et la gestion des volumes prélevables, les outils de modélisation hydrogéologique numérique (Aissat et al. [5bis]) permettent de tester des scénarios contrastés et d'aider les gestionnaires à prendre une décision adaptée.

A titre d'illustration, nous avons souhaité replacer les articles de ce numéro spécial dans ce cadre conceptuel d'évaluation des services écosystémiques et ainsi identifier, dans chacun de ces articles, le type d'aquifère considéré, les attributs hydrologiques ou hydrogéologiques étudiés et les services dépendant des aquifères abordés (Fig. 4). Ces études peuvent être également positionnées dans une suite logique d'un processus de connaissance qui vise à :

- Mieux comprendre les processus physiques et biogéochimiques du fonctionnement des aquifères (axe 1),
- Développer des outils de modélisation et d'aide à la gestion des eaux souterraines en conditions extrêmes (axe 2) ;
- Améliorer la gestion intégrée des eaux souterraines par le développement de SFN et de nouveaux modes de gouvernance (axe 3).

	Type aquifère					Attribut					Service			
	karst	multicouche	sables profonds	socle	Tous	Recharge	Piézométrie	Volume prélevable	Qualité	Débit cours d'eau	Stockage et production	Soutien débits d'étiage	Régulation des inondations	Assurance conditions extrêmes
AXE 1 : AMELIORER LA COMPREHENSION DES PROCESSUS PHYSIQUES ET BIOGEOCHIMIQUES DU FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES A DIFFERENTES ECHELLES														
[7] Wulleumier et al.														
[9] Perault et al.														
[11] Gaillard et al.														
[3] Lorette et al.														
[4] Viennet et al.														
[10] Fister et Marguet														
AXE 2: DEVELOPPER DES OUTILS DE MODELISATION ET D'AIDE A LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES EN CONDITIONS EXTREMES														
[1] Allier et al.														
[2] Bessière et al.														
[5] Bault et Laurencelle														
[5bis] Aissat et al.														
[6] Baulon et al.														
AXE 3: DEVELOPPER DES SFN ET DE NOUVEAUX MODES DE GOUVERNANCE POUR AMELIORER LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE														
[12] Mombertrand et Dubois														
[8] Cadilhac et al.														
[13] Nicoud et al.														

Figure 4. Types d'aquifères, attributs, services et types outils/ méthodes abordés dans les articles de ce numéro

Conclusion et perspectives

Nos travaux conduisent à recommander la prise en compte des aquifères pour l'évaluation des services liés à l'eau souterraine dans les futurs travaux de conception des SFN et d'évaluation des services écosystémiques, de manière à favoriser une gestion durable des eaux souterraines, et développer les synergies entre protection de la biodiversité, lutte contre le changement climatique, aménagement du territoire et protection de la ressource en eau. Le schéma conceptuel proposé illustre que les aquifères sont intégrateurs d'un ensemble d'occupations du sol, et que la prise en compte du fonctionnement hydrogéologique est incontournable pour évaluer l'effet de ces occupations du sol et des SFN sur les services dépendant des aquifères, comprendre leur temporalité (temps de réponse plus ou moins long d'un aquifère à un changement d'occupation du sol par exemple) et leur dimension spatiale (en lien avec les problématiques de gestion amont-aval). La compréhension et l'évaluation des services dépendant des aquifères nécessitent un changement d'échelle, de l'écosystème au bassin hydrogéologique.

Cet article montre également que de nombreux travaux des hydrogéologues ainsi que les outils qu'ils mettent en œuvre peuvent s'inscrire dans le cadre conceptuel des services écosystémiques et de leur évaluation. Les perspectives de recherche sur la relation entre aquifères, services écosystémiques et SFN

sont nombreuses : l'évaluation du rôle des aquifères dans la production de services écosystémiques par l'utilisation de modèles hydrogéologiques couplés à des approches socio-économiques (Qiu et al., 2019), la démonstration de la valeur d'assurance des aquifères par l'évaluation des services associés en contexte extrême (sécheresse, pluies cévenoles), l'évaluation du rôle de la composante biotique des aquifères pour les services dépendant des aquifères, ainsi que l'évaluation du rôle potentiel des SFN permettant de protéger et/ou d'améliorer le niveau de services dépendant des aquifères pour l'adaptation au changement global.

Références

- Brauman, K.A., 2015. Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 2, 345–358. <https://doi.org/10.1002/wat2.1081>
- Brauman, K.A., Daily, G.C., Duarte, T.K., Mooney, H.A., 2007. The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 32, 67–98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., Maginni, S., 2016. Nature-Based Solutions to address global societal challenges. IUCN.
- Griebler, C., Avramov, M., 2014. Groundwater ecosystem services: a review. *Freshw. Sci.* 34, 355–367. <https://doi.org/10.1086/679903>
- Guswa, A.J., Brauman, K.A., Brown, C., Hamel, P., Keeler, B.L., Sayre, S.S., 2014. Ecosystem services: Challenges and opportunities for hydrologic modeling to support decision making. *Water Resour. Res.* 50, 4535–4544. <https://doi.org/10.1002/2014WR015497>
- Hérivaux, C., Grémont, M., 2019. Valuing a diversity of ecosystem services: The way forward to protect strategic groundwater resources for the future? *Ecosyst. Serv.* 35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.011>
- Hérivaux, C., Maréchal, J., 2019. Prise en compte des services dépendants des aquifères dans les démarches d'évaluation des services écosystémiques. BRGM/RP-68929-FR.
- Keeler, B.L., Polasky, S., Brauman, K.A., Johnson, K.A., Finlay, J.C., O'Neill, A., Kovacs, K., Dalzell, B., 2012. Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 18619–18624. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215991109>
- MA, 2005. Millenium Ecological Assessment. Millennium Ecosystem and Human Well-being: A framework for Assessment.
- Nowak, C., Michon, J., 2017. Les écoulements des cours d'eau en période estivale. Les Synthèses N°15, juin 2017, AFB.
- Pettenati, M., Dörfliger, N., 2019. Des solutions d'infiltration et de recharge des aquifères fondées sur la nature pour adapter la gestion de la ressource en eau aux impacts du changement climatique, in: *Des Solutions Fondées Sur La Nature Pour s'adapter Au Changement Climatique. Rapport Au Premier Ministre et Au Parlement.* ONERC. p. 306.
- Qiu, J., Zipper, S.C., Motew, M., Booth, E.G., Kucharik, C.J., Loheide, S.P., 2019. Nonlinear groundwater influence on biophysical indicators of ecosystem services. *Nat. Sustain.* 2, 475–483. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0278-2>
- Tuinstra, J., Wensem, J. Van, 2014. Science of the Total Environment Ecosystem services in sustainable groundwater management. *Sci. Total Environ.* 485–486, 798–803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.098>