

Les défis de la gestion quantitative de l'eau souterraine en France

Maréchal Jean-Christophe¹, Rouillard Josselin², Dörfliger Nathalie³

Introduction

A l'échelle nationale, la France dispose de ressources en eau abondantes, grâce à de fortes précipitations (900 mm/an), à de grands fleuves qui s'écoulent depuis les chaînes de montagnes et à de grands volumes d'eau souterraine stockés dans les aquifères. Chaque année, la France reçoit 480 milliards de m³ de précipitations plus 11 milliards de m³ d'eaux de surface en provenance des pays voisins (dont le Rhin). De cette quantité d'eau, environ 75 % sont perdus par évaporation et transpiration à travers la végétation. En conséquence, environ 170 milliards de m³ sont disponibles pour les écosystèmes, les voies navigables, le refroidissement de centrales électriques et pour la consommation, ce qui correspond à environ 2540 m³/habitant/an.

On estime à 2000 milliards de m³ le volume contenu dans les aquifères. Cependant, les ressources en eau ne sont pas réparties de manière égale dans tout le pays et leur disponibilité peut varier considérablement selon les saisons. Les régions méditerranéennes du sud ont un climat sec et changeant, tandis que la région du sud-ouest mais aussi du bassin parisien sont souvent affectées par la sécheresse. Les eaux souterraines jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau, notamment en eau potable où l'eau souterraine représente environ 68% des prélèvements (soit 3,7 milliards m³/an). De plus, 31% des prélèvements industriels se font en eau souterraine et 37% des prélèvements agricoles.

Un certain nombre de questions concernant l'état des ressources en eau (quantité et qualité) se posent et nécessitent de développer de nouvelles stratégies de gestion et de protection.

Questions de gestion des eaux souterraines

Problèmes de qualité

Selon la directive-cadre européenne sur l'eau, 67 % des masses d'eau souterraine en France sont considérés en bon état chimique en 2013 (Fig. 1a). Les principaux problèmes de qualité des eaux souterraines sont liés à la contamination diffuse par les pratiques agricoles (engrais et pesticides). Des teneurs élevées en nitrates sont par exemple observées dans les aquifères cristallins de Bretagne, en raison des effluents de l'élevage intensif du porc et de l'agriculture.

Dans les aquifères karstiques, le problème est lié aux débits rapides pendant les crues qui apportent turbidité et bactéries dans le réseau karstique jusqu'aux sources. Il est nécessaire de cartographier correctement la vulnérabilité de ces aquifères à la pollution et de définir en conséquence des règles appropriées d'utilisation du territoire. Les stations d'épuration des eaux usées et les réseaux d'égouts doivent être bien conçus et entretenus, en particulier en cas d'inondations.

Dans les zones côtières, en particulier dans les îles d'outre-mer, l'intrusion d'eau de mer peut être induite par des débits élevés de pompage à des fins d'irrigation et de consommation dans les régions densément peuplées. La surveillance de la géométrie et des fluctuations de l'interface eau salée-eau douce est nécessaire afin de bien gérer le captage d'eau. Dans plusieurs cas, la recharge artificielle des aquifères est utilisée pour faire face à l'intrusion saline. Par rapport à d'autres pays (par exemple l'Espagne), l'intrusion d'eau de mer est relativement bien gérée en France.

Dans les aquifères alluviaux, la pollution des cours d'eau entraîne une contamination potentielle des eaux souterraines, en particulier lorsque les puits de pompage sont situés à proximité des rivières. L'impact potentiel de la filtration des berges des cours d'eau et des aquifères est une question scientifique de plus en plus importante.

¹ Responsable d'unité, D3E/NRE, BRGM, Univ. Montpellier, jc.marechal@brgm.fr

² Economiste de l'eau, D3E/NRE, BRGM, Univ. Montpellier, j.rouillard@brgm.fr

³ Responsable de programme scientifique, DG, BRGM, n.dorfliger@brgm.fr

Problèmes de quantité

Dans le cadre de la directive cadre européenne sur l'eau, les agences de l'eau analysent l'état des aquifères souterrains. En 2013, 10 % des masses d'eau souterraine étaient considérées dans un mauvais état quantitatif (Fig. 1b).

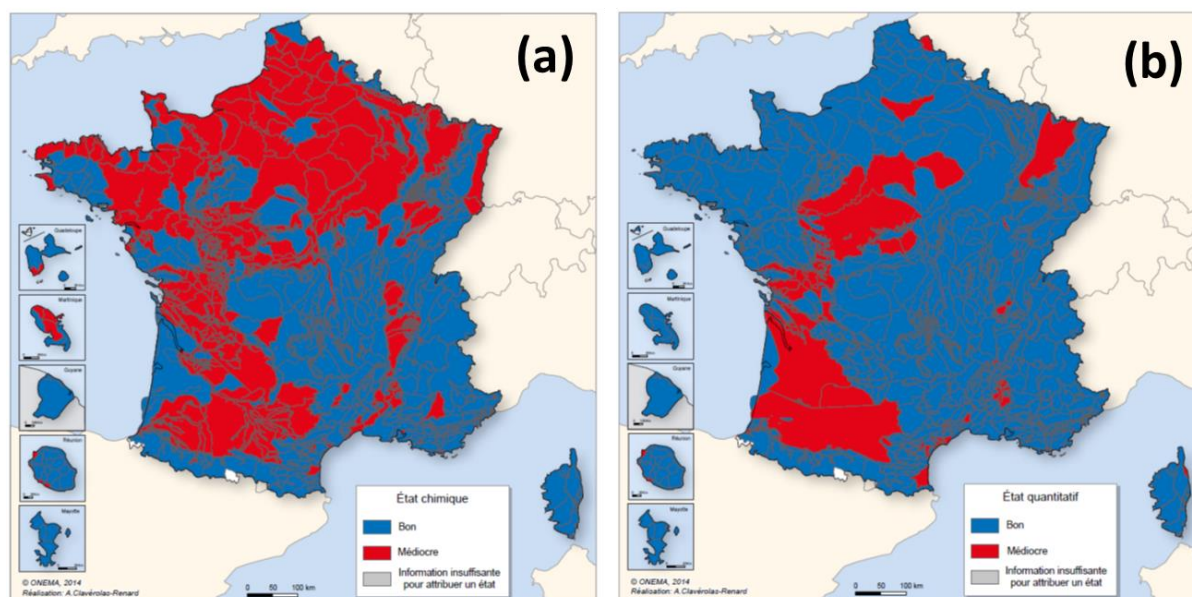


Figure 1 : Etat chimique (a) et quantitatif (b) des masses d'eau souterraines en France en 2013, d'après Petit et Michon (2015)

Les taux d'exploitation actuels des aquifères varient considérablement (Margat 2006) :

- Les aquifères les plus exploités ne sont pas nécessairement ceux dont les rendements en forage sont les plus élevés. Par exemple, les grands aquifères libres avec des taux de recharge élevés et de grands volumes de stockage (par exemple, les aquifères karstiques), sont souvent sous-utilisés ;
- Les taux d'exploitation atteignant 100% sont rares : dans la plupart des cas, l'extraction a augmenté l'infiltration des rivières, ce qui compense les pertes dues aux prélèvements.
- Dans la plupart des aquifères, le volume de captage est inférieur à un dixième de l'écoulement naturel des eaux souterraines.

L'abaissement du niveau de la nappe est observé dans quelques aquifères où les débits d'eau sont déséquilibrés (c.-à-d. que le taux de pompage est plus élevé que la réalimentation de l'aquifère par recharge naturelle). Dans ces cas, des études ont été lancées par les agences de l'eau afin de définir une limite volumétrique ("volumes prélevables") des eaux souterraines qui peuvent être prélevées dans les aquifères.

La baisse du niveau des eaux souterraines peut avoir plusieurs effets néfastes. Dans les aquifères alluviaux (ou d'autres aquifères peu profonds reliés aux eaux de surface), la baisse de la nappe phréatique induite par le pompage peut réduire temporairement les écoulements d'eaux souterraines vers les eaux de surface. Cela réduira le débit de base de la rivière pendant les périodes sèches, menaçant la vie aquatique et diminuant la qualité de l'eau. C'est le cas, par exemple, du Tarn, de la Dordogne et du Lot dans le sud-ouest de la France, ainsi que de plusieurs rivières en Beauce et dans le nord de la France.

Dans certains cas, le déclin de la nappe aquifère peut inverser l'écoulement naturel des échanges entre l'aquifère et les eaux de surface, ce qui peut entraîner une détérioration de la qualité des eaux souterraines. Des recherches sont en cours dans les aquifères karstiques où les échanges d'écoulement entre les eaux de surface et les eaux souterraines sont très complexes. La plupart du temps, dans les aquifères libres, l'augmentation de la recharge induite contrebalance le pompage et la nappe phréatique reste stable (Fig. 1a).

L'abaissement de la nappe phréatique peut également menacer les zones humides. Le maintien d'une nappe phréatique proche de la surface du sol pendant une période suffisamment longue chaque année pour soutenir les plantes aquatiques est un défi pour certaines zones humides. Par exemple, le marais

poitevin présente un risque élevé d'impacts négatifs lors des sécheresses dues au pompage des eaux souterraines pour l'irrigation agricole.

Dans quelques aquifères captifs, l'absence de recharge directe ou indirecte induit l'épuisement à long terme de la nappe phréatique (Fig. 2b). Dans ces aquifères multicouches, les échanges hydrauliques verticaux dépendent du gradient hydraulique entre les aquifères. L'écoulement ascendant naturel d'un aquifère profond captif vers un aquifère libre superficiel peut être inversé par la baisse du niveau d'eau induite dans l'aquifère profond par des taux de pompage élevés. Dans ce cas, une eau de moins bonne qualité provenant de l'aquifère superficiel peut contaminer l'eau de l'aquifère profond. Il est donc important de bien gérer le pompage dans les deux aquifères afin d'éviter une telle contamination.

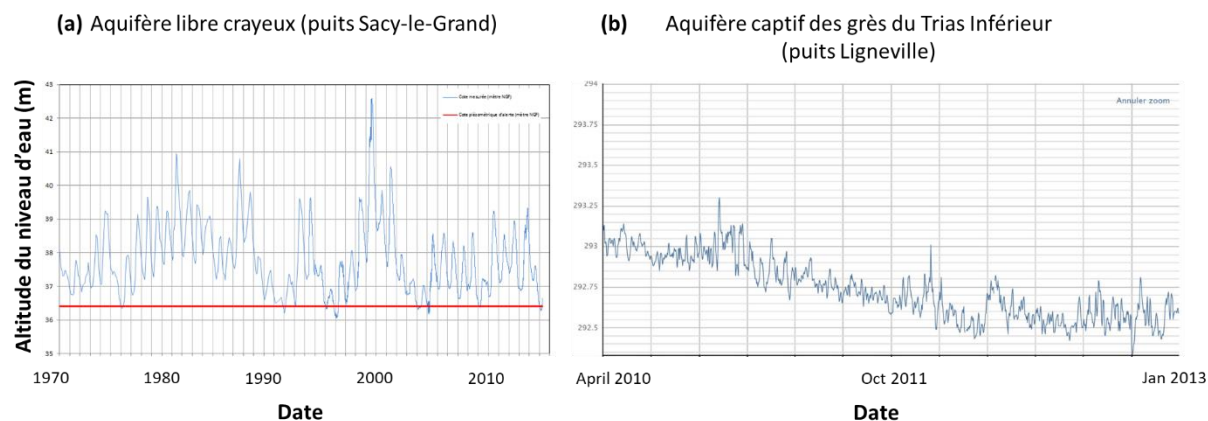


Figure 2 : a) Fluctuations de la nappe phréatique dans un aquifère libre b) Fluctuations de la pression de l'eau dans un aquifère captif

En résumé, la France n'est pas confrontée aux problèmes d'épuisement des aquifères que connaissent de nombreux autres pays. Toutefois, les écosystèmes connexes qui dépendent de l'eau souterraine sont plus susceptibles d'être touchés par l'exploitation de l'eau souterraine.

Les défis à long terme

Changement climatique et recharge

Le projet Explore 2070³ a développé et évalué des stratégies d'adaptation aux impacts du changement climatique sur les systèmes hydrologiques et les milieux côtiers de la métropole et de l'Outre-mer à l'horizon 2070, en fonction de différents scénarios climatiques, démographiques et socio-économiques. L'élévation de la température (et par conséquent de l'évapotranspiration), combinée à la diminution des précipitations, entraînera à l'avenir une diminution des précipitations efficaces. L'application de sept modèles climatiques utilisant le scénario médian d'émissions de gaz à effet de serre (A1B, 4e rapport du GIEC) a permis d'estimer l'évolution des taux de recharge naturelle (Fig. 3). Avec des variations de recharge prévues de +10 à -30 % dans les scénarios optimistes et de -20 à -55 % dans les scénarios pessimistes, on peut s'attendre à une baisse des niveaux des eaux souterraines dans des proportions similaires, et donc à une diminution significative des ressources en eaux souterraines d'ici 2070. Deux secteurs risquent d'être plus gravement touchés :

- le bassin de la Loire avec une baisse de recharge de 25 à 30 % sur la moitié du bassin,
- le sud-ouest de la France avec, par endroits, une baisse de 30 à 50 % de la recharge.

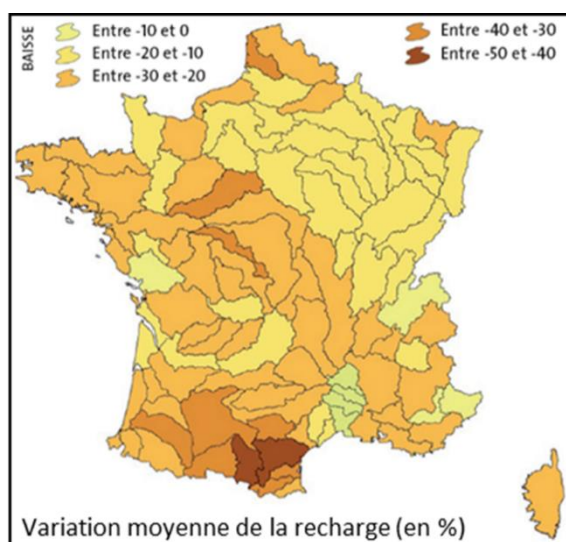


Figure 3 : Impact du changement climatique sur les taux de recharge naturelle des aquifères d'ici 2045-2065 (d'après MEDD 2015).

Changement climatique et élévation du niveau de la mer

L'élévation du niveau de la mer devrait avoir plusieurs impacts (Fig. 4) :

- Un risque accru d'intrusion d'eau salée, en particulier dans les aquifères karstiques.
- une progression de l'interface eau salée/eau douce dans les estuaires et l'infiltration d'eau salée dans les aquifères libres : ce phénomène pourrait être accentué par la baisse des débits fluviaux due au changement climatique ou à l'augmentation des prélèvements d'eau souterraine
- Submersion/inondation des basses terres par l'eau de mer et infiltration d'eau salée dans des aquifères libres.

Le risque d'inondation est particulièrement élevé le long de la côte méditerranéenne où des zones importantes sont susceptibles d'être inondées en raison de leur très faible altitude.

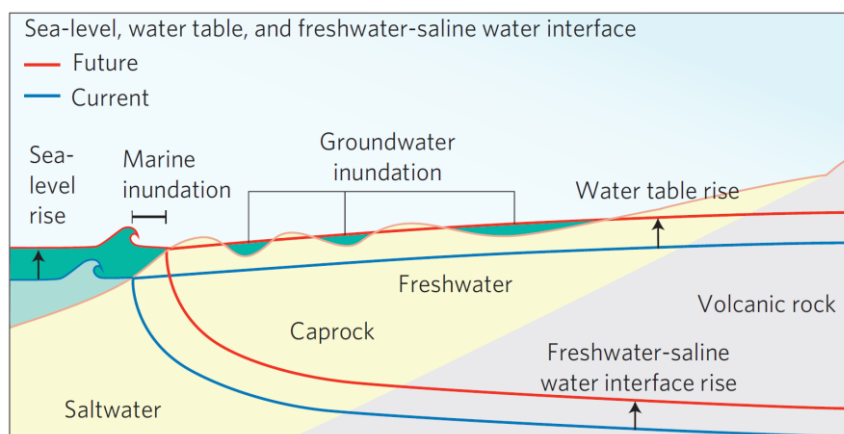


Figure 4 : Impacts de l'élévation du niveau de la mer, d'après Rotzoll et Fletcher (2013)

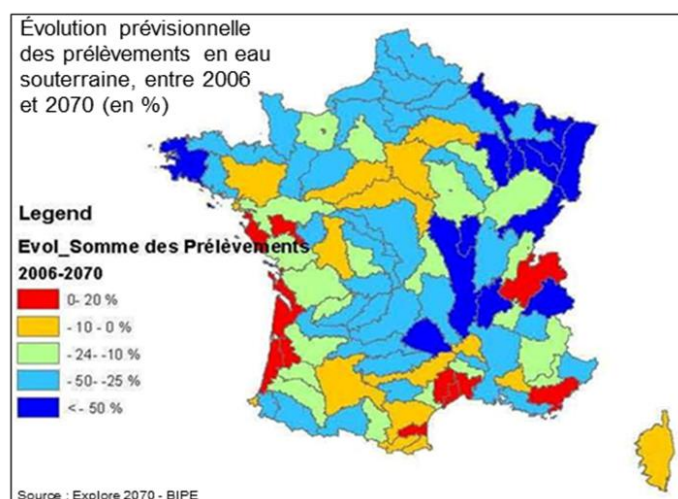
Changements futurs dans l'utilisation de l'eau souterraine

Le principal scénario de changement est une diminution globale de 20 % des prélèvements d'eau souterraine d'ici 2070 (Tab. 1). Les prélèvements d'eau potable devraient diminuer de 15 % en raison de la baisse des taux de consommation individuelle et des pertes de réseau. La consommation industrielle devrait diminuer de 53 % en raison des efforts de recyclage et des changements de production. La demande agricole devrait rester stable sous réserve d'adaptation des types de culture. La figure 5 illustre la répartition régionale probable des changements dans les prélèvements d'eau souterraine.

Tableau 1 : Changements prévus dans les prélèvements d'eau souterraine (Mm³)

Année	Eau potable	Irrigation	Industrie	Total
2006	3631	1276	1436	6344
2070	3100	1271	679	5050
Variation (%)	-14.6	-0.4	-52.7	-20.3

On s'attend à ce que les changements climatiques induisent une modification des prélèvements d'eau souterraine avec pour conséquence une baisse des niveaux d'eau en général, mais plus accrue sur les plateaux ou dans les zones côtières, avec risque accru d'intrusion saline pour ces dernières liées notamment à une augmentation de la demande (Fig. 5).

**Figure 5** : Évolution prévue des prélèvements d'eau souterraine (de 2006 à 2070)

Nouvelles stratégies et politiques de gestion des eaux souterraines

On s'attend à ce qu'un nombre croissant de bassins soient confrontés à un déséquilibre croissant entre les ressources disponibles et la demande en eau. Plusieurs stratégies sont possibles afin de réduire ce déséquilibre. Nous abordons ici trois approches en cours d'expérimentation sur plusieurs sites en France.

Gestion volumétrique

L'Etat a engagé sur les bassins et aquifères présentant des déficits quantitatifs structurels une réforme des autorisations de prélèvements suivant une « gestion volumétrique ». La gestion volumétrique a pour objectif de contrôler la demande en eau par l'instauration d'un volume prélevable maximum. Ces « quotas » sont définis au niveau d'unité hydrologique et hydrogéologiques cohérents et se déclinent en volumes prélevables en période estivale et hivernale pour l'eau potable, l'industrie et l'irrigation agricole. En période de crise (sécheresse), les acteurs du territoire peuvent suivre des règles plus fines de gestion définissant des volumes prélevables hebdomadaires, comme par exemple dans le Marais Poitevin pour l'eau d'irrigation. La gestion volumétrique est communautaire : ainsi, les usagers participent pleinement à la prise de décision sur le partage de l'eau disponible. Les volumes sont répartis par négociation entre les principaux usages (eau potable, industriel et agriculture) ainsi qu'entre les usagers eux-mêmes (entre agriculteurs pour le volume prélevable agricole). Le modèle de gestion utilisant des limites volumétriques qui est actuellement déployé dans un nombre limité de masses d'eaux souterraines devra être mis en œuvre dans de nombreuses autres et reposer sur une bonne connaissance du fonctionnement de l'aquifère.

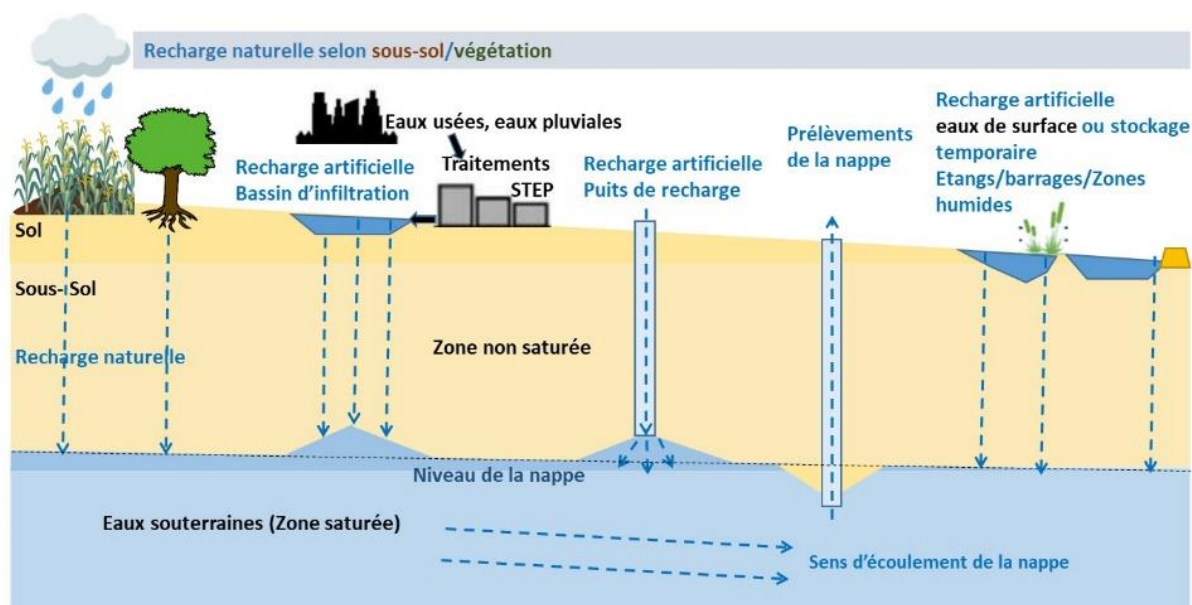
Recharge artificielle

Un " bon état quantitatif " des eaux souterraines est atteint lorsque le volume d'eau prélevé est inférieur à la capacité de renouvellement de l'aquifère et lorsque la santé de l'écosystème de surface (par exemple

zone humide, rivière) est préservée. Avec la croissance continue de la population et le changement climatique, la gestion des ressources en eau souterraine en France est principalement axée sur une utilisation plus efficace de l'eau. Mais il est probable que ces mesures ne suffiront pas à faire face aux pénuries d'eau dans certaines régions, et la recharge artificielle des aquifères pourrait être un moyen efficace de maintenir et d'améliorer la qualité et la quantité des eaux souterraines. Elle permet un stockage en milieu souterrain, le volume d'eau n'étant pas soumis à l'évaporation.

En France, l'infiltration des eaux de surface par les bassins et la filtration sur berge induite sont les systèmes de recharge artificielle les plus nombreux. La plupart d'entre eux sont situés dans des plaines alluviales ou des aquifères sédimentaires, mais ils ne contribuent que pour 3 % à l'approvisionnement en eau potable. Actuellement, la technique de recharge artificielle est utilisée pour maintenir les niveaux d'eau dans les aquifères pompés mais aussi pour améliorer la qualité des eaux souterraines, par exemple pour contrer l'intrusion saline dans les aquifères côtiers (exemple du projet Aquarenova à Hyères), ou pour améliorer la qualité des eaux pompées dans les plaines alluviales proches d'une rivière polluée par un système double pompe/injection. D'autres systèmes d'injection directe peuvent être mis en œuvre, par l'intermédiaire de forages d'injection dans la nappe alluviale ou dans un aquifère sous-jacent.

A l'avenir, la recharge artificielle pourrait constituer une solution alternative pour faire face à la diminution des taux de recharge naturelle sous l'effet du changement climatique. Le coût de la recharge (y compris l'entretien des systèmes d'infiltration, voir des traitements à mettre en œuvre en surface sans oublier le rôle du sous-sol comme traitement complémentaire) et l'efficacité de la récupération (le volume d'eau infiltrée qui peut être récupéré pour n'importe quelle utilisation) demeurent les principaux enjeux de la mise en œuvre de ces solutions de gestion. L'eau injectée ne doit en aucun cas entraîner une dégradation de la qualité de l'eau souterraine de l'aquifère concerné.



De la recharge naturelle à la recharge artificielle (brgm, 2019)

Gestion active des eaux souterraines

Les aquifères karstiques sont d'importants réservoirs d'eau souterraine qui permettent de répondre à la demande en eau sans cesse croissante résultant de l'explosion démographique dans les secteurs côtiers et dans les principales villes, en particulier dans le bassin méditerranéen. Grâce à la " gestion active des eaux souterraines " (Collin 1994), les ressources en eau de ces systèmes peuvent être utilisées de façon optimale en surmontant les effets négatifs des variations importantes du débit des sources. En saison sèche, il faut pour cela pomper à un débit plus élevé que le débit naturel de la source afin de puiser dans les réserves d'eau de l'aquifère, qui seront à leur tour reconstituées lors de la saison des pluies suivante. Cela réduit également l'intensité des inondations au début de la saison des pluies. Les systèmes aquifères karstiques en France sont souvent situés en amont d'un bassin versant côtier urbanisé et soumis à des

crues éclair de type méditerranéen. Ces dernières provoquent des inondations et des dégâts matériels qui, à leur tour, peuvent avoir des impacts économiques considérables ou entraîner des pertes en vies humaines, comme ce fut le cas à Nîmes en 1988.

La conservation des écosystèmes fluviaux côtiers est également une question clé, en particulier pendant les périodes de faible débit, lorsqu'une partie de l'eau souterraine pompée est détournée vers la rivière pour aider à maintenir le débit et, par conséquent, l'équilibre écologique de la rivière. La gestion active de ces aquifères est un moyen intégré d'aborder ces questions apparemment contradictoires : compléter la demande en eau potable, réduire les risques d'inondation et préserver les milieux aquatiques.

Dans l'aquifère karstique du Lez en gestion active, un modèle numérique a été utilisé pour simuler plusieurs scénarios de pompage sous le climat actuel et futur (2045-2065) (Ladouche et al. 2013). Il est utile de déterminer le débit de pompage durable permettant de respecter le niveau d'eau autorisé. On constate que le taux de pompage actuel permet à l'aquifère de se recharger totalement et le niveau de la nappe retrouve chaque année son niveau naturel (Fig. 6). Cette gestion dynamique pourrait également être envisagée pour d'autres systèmes aquifères fortement influencés par des recharges marquées par une cyclicité.

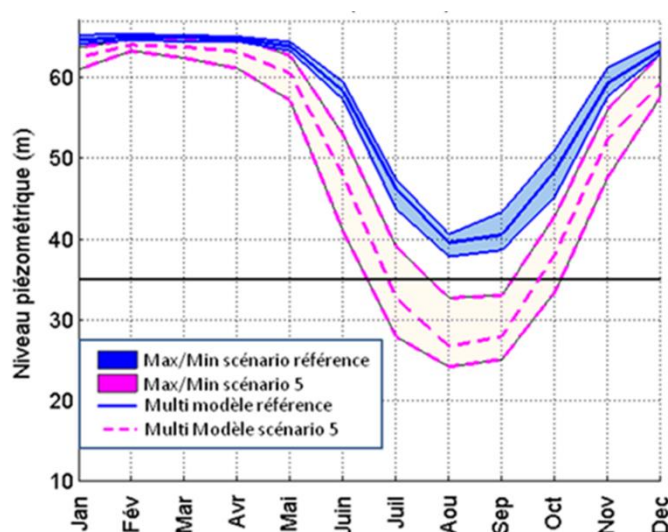


Figure 6 : Résultats de la modélisation à la source du système karstique de Lez - Comparaison des niveaux d'eau actuels sous le débit de prélèvement actuel (33 Mm3/an)-scénario référence avec les niveaux d'eau futurs sous le changement climatique et le taux de prélèvement accru (44 Mm3/an)-scénario 5 - La ligne noire horizontale correspond au niveau minimal autorisé, modifié d'après Maréchal et al (2014).

Conclusion

Bien que la France dispose de ressources abondantes en eaux de surface et en eaux souterraines, la forte demande en eau et les émissions massives de polluants, ainsi que les effets prévus du changement climatique, exercent une pression importante sur la durabilité à long terme des réserves en eaux souterraines. Les instruments de réglementation et de politique existants fournissent un cadre complet pour la gestion des eaux souterraines. Toutefois, il est nécessaire d'améliorer la gestion et de sensibiliser davantage les responsables politiques à la valeur à long terme de la protection des ressources en eaux souterraines, reposant sur des connaissances suffisantes des aquifères (réseau piézométrique, prélèvements). Compte tenu de la grande hétérogénéité spatiale des situations à travers le pays, la gestion future devra également être souple pour permettre la mise en œuvre de stratégies nationales de manière ciblée et adaptée aux diverses situations.