



Les Etudes de Volumes Prélevables (EVP) des eaux souterraines : Bilan pour le bassin RMC

Tim Bulle

G-eau



G-Eau Working Paper No. 22

Les Etudes de Volumes Prélevables (EVP) des eaux souterraines : Bilan pour le Bassin RMC

Tim Bulle

Bulle, T. 2026. Les Etudes de Volumes Prélevables (EVP) des eaux souterraines : Bilan pour le bassin RMC. G-EAU Working Paper/Rapport de Recherche No.22. Montpellier, France. <http://www.g-eau.net/>

Copyright 2026, by G-Eau. All rights reserved. G-Eau encourages the use of its material provided that the organization is acknowledged and kept informed in all such instances.

L'Auteur

Tim Bulle

UMR G-eau, IRD, 361 Rue Jean François Breton, 34090 Montpellier

Etude réalisée en 2024 comme stage du M1 Master Eau de Montpellier, sous la supervision de François Molle

Résumé

Ce working paper s'intéresse à un aspect de la gestion quantitative en France à savoir les Études de Volumes Prélevables (EVP) des masses d'eau souterraines sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse. L'objectif est d'extraire de ces 15 EVP la définition du volume prélevable qui en est faite. Pour ce faire ces études sont analysées via une comparaison quantitative prenant en compte la recharge, les prélèvements et le volume prélevable, et via une comparaison qualitative regroupant les critères de « surexploitation », les incertitudes et ambiguïtés, ainsi que l'encadrement temporel et spatial. Cette analyse conclut que l'expression de la notion de volume prélevable se fait parfois sous le prisme d'une vision erronée du « Safe Yield » ou sous influence politique jouant sur le manque de connaissance de la masse d'eau et sur l'impossibilité de faire machine arrière une fois les usages établis.

Mots-clés : *Gestion quantitative, EVP, eaux souterraines, Volume prélevable, Rhône-Méditerranée-Corse*

Abstract

This working paper focuses on an aspect of quantitative water management in France, specifically EVP of groundwater bodies in the Rhône-Méditerranée-Corse basin. The aim is to derive the definition of "how much groundwater can be extracted sustainably" from these 15 EVPs. To achieve this, the studies are analyzed through a quantitative comparison considering recharge, withdrawals, and sustainable withdrawable volume, and a qualitative comparison encompassing criteria of "overexploitation," uncertainties and ambiguities, as well as temporal and spatial frameworks. This analysis concludes that the notion of sustainable withdrawable volume is often expressed through a flawed vision of "Safe Yield" or under political influence, using the lack of knowledge about the water body and the impossibility of reversing decisions once human uses are established.

Keywords : *Water management, EVP, Groundwater, Safe Yield, Rhône-Méditerranée-Corse*

TABLE DES MATIERES

1	Contexte	6
1.1	Historique de la mise en place des Etudes de Volumes Prélevables	7
1.2	Un cahier des charges « type » des Etudes de Volumes Prélevables appliqué aux eaux souterraines.	7
1.3	Incertitudes sur la méthode d'estimations des Volumes Prélevables	9
1.4	Impacts du changement climatique sur les estimations des Volumes Prélevables.....	10
1.5	Confusions autour de la notion de Volume Prélevable	10
2	Méthodologie	12
2.1	Comparaison quantitative	12
2.2	Comparaison qualitative.....	12
3	Résultats	12
3.1	Résultats quantitatifs	14
3.1.1	Comparaison entre la recharge et les prélèvements.....	14
3.1.2	Comparaison entre la recharge et le volume prélevable.....	15
3.1.3	Comparaison entre le prélèvement et le volume prélevable	16
3.1.4	Efforts à fournir pour atteindre le volume prélevable.....	16
3.1.5	Synthèse de l'analyse quantitative	17
3.2	Résultats qualitatifs.....	17
3.2.1	Critères de détermination du volume prélevable et des piézométries de référence.....	17
3.2.2	Incertitudes et ambiguïtés.....	27
3.2.3	Prise en compte de la temporalité	29
3.2.4	Prise en compte de la spatialité	29
3.2.5	Synthèse de l'analyse qualitative.....	30
4	Interprétation	31
4.1	Interprétation quantitative.....	31
4.2	Interprétation qualitative	32
5	Conclusion.....	33
6	Bibliographie.....	35
7	Annexe	37

1 Contexte

En France, l'amplification des déséquilibres quantitatifs et qualitatifs, induite par l'augmentation des prélèvements et le changement climatique, nécessite une solide gestion quantitative des ressources en eau. Au cœur de cette gestion se trouvent les Etudes Volumes Prélevables (EVP), dont l'objectif est de définir les volumes annuels à mensuels que l'on peut prélever dans les masses d'eau superficielles et souterraines tout en assurant la protection des milieux aquatiques. Il est donc d'un grand intérêt de s'intéresser à comment est déterminé un volume qu'il est « souhaitable » de prélever afin de maintenir un socio-hydrosystème durable. Une analyse des EVP portant sur les eaux superficielles des bassins du Languedoc Roussillon (Bassin RMC) a déjà été réalisée en 2022 (Barrazza & Molle, 2022). Ce document s'intéresse à son tour aux études EVP portant sur les nappes du bassin Rhône Méditerranée-Corse (RMC).

La vision des nappes comme des réservoirs d'accumulation nourrit l'idée simple mais erronée que l'on doit tout simplement calculer la recharge de l'aquifère et prendre cette valeur comme limite supérieure des prélèvements. Les systèmes aquifères doivent se comprendre comme des systèmes qui, à l'état naturel et nonobstant les temps de réponse des dynamiques d'écoulement souterraines, ont des 'sorties' (outflow) égales en moyenne aux entrées (infiltrations ou transferts latéraux depuis les aquifères contigus). Ainsi, les prélèvements anthropiques nets vont modifier ces dynamiques et réduire les sorties des aquifères, i.e. leur drainage à travers les sources, les rivières, les zones humides, la végétation alimentée par les nappes phréatiques, voire les sorties en mer. Le prélèvement 'souhaitable', 'maximum', 'admissible', 'durable', 'optimum', etc. dépend donc de comment on évalue les impacts (en général négatifs) liés à la baisse des sorties, et leur commensuration avec les impacts (en général positif) liés aux usages anthropiques.

Déterminer le « safe yield » revient à affirmer que l'on est capable d'obtenir la valeur qui sépare ce qui est 'trop' de ce qui est 'assez', on tombe alors dans le « How Much Is Enough Myth » (Capon et al., 2017). La quantité d'eau qui constitue le 'assez' ne peut être séparée de l'usage qui en est fait, il faut alors se demander « combien d'eau faut-il et pour quel usage ? ». Ainsi, la notion du « safe yield » va évoluer au cours du temps. Par exemple en 1915 Lee considère que la limite se situe au niveau de la réserve de l'aquifère (Kalf & Wolley, 2005) tandis qu'en 2007 Ponce étend les critères limitants aux « aspects hydrologiques, écologiques, socio-économiques, technologiques, culturels, institutionnels et juridiques de l'utilisation des eaux souterraines » (Ponce, 2007). La définition du volume prélevable dépend donc de la philosophie sous-jacente concernant le rôle et la valeur des milieux alimentés par les 'sorties' : soit anthropocentrique, i.e. qui sont maintenues en fonction des besoins de l'Homme ; soit écocentriques, i.e. les quantités d'eau nécessaires à la santé des écosystèmes aquatiques (Avril et al., 2017). Le volume prélevable a ainsi pour but de rétablir l'équilibre entre les entrées et les sorties du système, or pour ce faire il est nécessaire d'établir un cadre spatial et temporel (Richter et al., 2017). Sachant que l'anthropisation modifie à la fois les entrées (ex : imperméabilisation des sols) et les sorties (ex : prélèvements) (Stewardson et al., 2017), le retour à l'équilibre doit nécessairement passer par des compromis entre les aspects anthropiques (économie, social, etc.) et environnementaux (zones humides, relation nappe-rivière, etc.). Ajoutons que vouloir restaurer les milieux à leur état « naturel » n'est pas toujours une solution. D'une part, ils sont en évolution constante et ce phénomène est amplifié par le changement climatique ; d'autre part, certains systèmes sont anthropisés depuis trop longtemps et ont co-évolué avec les humains (Alexandra et al., 2023). La détermination du volume prélevable nécessite donc une approche holistique pour un temps donné et un espace défini, ce qui explique que les sciences environnementales ne peuvent pas, à elles seules, déterminer le *safe yield* puisque celui-ci n'est pas qu'un simple chiffre neutre et objectif.

1.1 Historique de la mise en place des Etudes de Volumes Prélevables

En 1964, la France organise sa gestion de la ressource en eau en grands bassins hydrographiques, c'est le début de la gestion concertée. Durant les années 60, les efforts de gestion de l'eau portent davantage sur les aspects qualitatifs et de pollution. En 1984, les premières mesures environnementales apparaissent, avec les débits réservés, suivis en 1992 par la « Loi sur l'eau » qui déclare cette ressource comme « patrimoine commun de la Nation » et instaure la préservation des zones humides et des milieux aquatiques (Office internationale de l'eau, 2009). Cependant, des sécheresses exceptionnelles soulignent la nécessité de recourir à une gestion quantitative. Par exemple, la création des Zones de Répartition des Eaux (ZRE) en 1994 dresse une liste de bassins et sous-bassins classés en déficit. L'intense sécheresse de 2003 déclenche la publication de deux circulaires. La première en septembre 2003 intègre les masses d'eau souterraines aux ZRE, tandis que la seconde en 2004, vise à fortement renforcer les déclarations et autorisations de prélèvements afin d'instaurer un contrôle volumétrique. Durant la même période, la France met en place un dispositif de gestion de crise renforcée en cas de sécheresse ainsi qu'un plan d'action global par sous-bassin ou nappe, le Plan de Gestion de la Ressource en Eau (PGRE). Ce dispositif inclut 3 outils : les volumes maximum pouvant être prélevés (cadre juridique d'exploitation), les débits réservés (pour les écosystèmes) et les arrêtés sécheresse (déclinés en 3 seuils : alerte, crise et crise renforcée) (Office internationale de l'eau, 2009).

La gestion quantitative se structure progressivement dans le programme (2003-2006) de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse ou encore dans le contenu des SDAGE en 2006. En 2007 les Organismes Uniques de Gestion Collective (OUGC) sont créés et ont pour but de collecter les demandes des irrigants afin de dresser un plan de répartition du prélèvement global autorisé, et les modifications de celui-ci en cas de crise. En 2008, une circulaire étend la gestion quantitative à tous les bassins déficitaires et fait apparaître la notion de volume prélevable. Ce volume (mensuel) doit permettre un bon fonctionnement des milieux aquatiques 4 années sur 5, sans recours aux arrêtés sécheresses. Les Etudes de Volumes Prélevables (EVP) sont alors lancées afin de déterminer, à des points stratégiques définis pour chaque sous-bassin versant, les prélèvements annuels à mensuels maximum permettant la résorption du déficit. Les études ainsi que les révisions de prélèvement sont censées être réalisées avant la fin 2014 (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2022). Ces valeurs une fois déterminées, les PGRE regroupent un ensemble d'actions dont l'objectif, à terme, est d'atteindre l'équilibre entre les prélèvements et la ressource, tout en préservant le bon fonctionnement des milieux aquatiques et en tenant compte du changement climatique (Bassin Rhône Méditerranée, 13 mai 2024).

1.2 Un cahier des charges « type » des Etudes de Volumes Prélevables appliqué aux eaux souterraines

Une EVP pour les eaux souterraines se déroule en général sur 6 phases (Figure 1). La première phase consiste à caractériser l'aquifère et à recueillir un maximum d'informations sur celui-ci. Le rapport de phase 1 précise le type d'aquifère (libre, captif, semi-captif), sa structure géologique (alluviale, fissuré, karstique, etc.), sa géométrie, son contexte géologique, sa composition ou encore les interactions nappe-rivière. La phase 2 expose les prélèvements selon les usages, en les quantifiant ou en les estimant selon les données disponibles, puis montre la tendance actuelle et l'évolution possible des besoins. La phase 3 a pour but de connaître l'impact des prélèvements sur la ressource. Pour ce faire, les capacités de l'aquifère sont estimées via ses paramètres hydrodynamiques, un bilan hydrogéologique ou par étude des chroniques piézométriques. Il est alors possible d'estimer l'impact des forages via simulation numérique, calcul du bilan ou encore analyse statistique et historique des chroniques. La phase 4 vise à définir des objectifs quantitatifs lié aux impacts des prélèvements. Ces objectifs peuvent être liés à divers problèmes engendrés par la surexploitation comme la chute brutale du niveau piézométrique, l'assèchement périodique de rivières ou de zones humides, le risque d'intrusion saline ou encore la menace de déconnexion de zones humides et de forêts alluviales. Ces facteurs limitants permettent de fixer des seuils quantitatifs qui interviennent dans la phase 5. En effet, les NPA (Niveau Piézométrique d'Alerte) et les NPCr (Niveau Piézométrique de Crise renforcée) forment les limites piézométriques (Figure 2). Le NPA est le seuil à partir duquel les premiers conflits d'usage et les premières limitations de pompages apparaissent. Le NPCr quant à lui est un seuil qu'il ne faut jamais atteindre et pour lequel

tous les usages sont interdits sauf l'alimentation en eau potable qui peut être limitée. Les volumes prélevables remplissent le rôle de limite quantitative. Issus des limites piézométriques, de modélisation ou de bilan, ils indiquent la quantité d'eau maximale qui peut être pompée sans contraindre les objectifs précédemment définis dans la phase 4. Une fois les volumes prélevables calculés, il est important de les répartir selon les usages et de les comparer aux prévisions futures, ce qui constitue la phase 6. En général, la plus grosse partie et la priorité est donnée à l'AEP, suivie par l'industrie ou l'agriculture selon les caractéristiques du bassin. De plus, des propositions de mesures pour atteindre l'objectif quantitatif peuvent être suggérées, telles que l'amélioration du transport de l'eau, l'adoption de techniques ou de technologies d'irrigation plus performantes, des changements des modalités d'exercice d'une même activité, des changements d'activités ou encore la mobilisation de ressources nouvelles (Conseil scientifique du comité du bassin Rhône-Méditerranée, 2011).

Figure 1 : Schéma des étapes « types » de la réalisation d'une EVP-eaux-souterraines

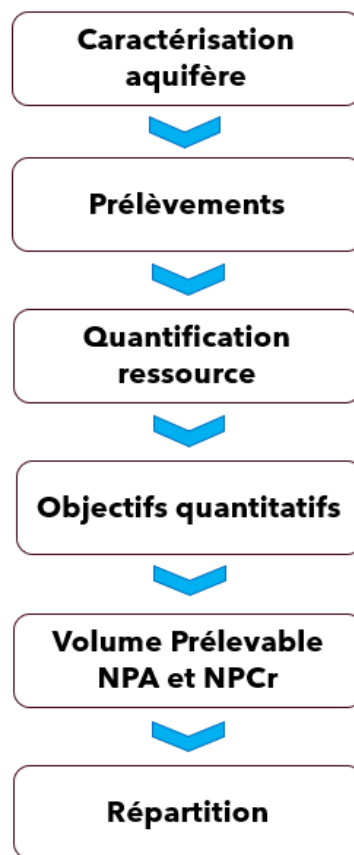
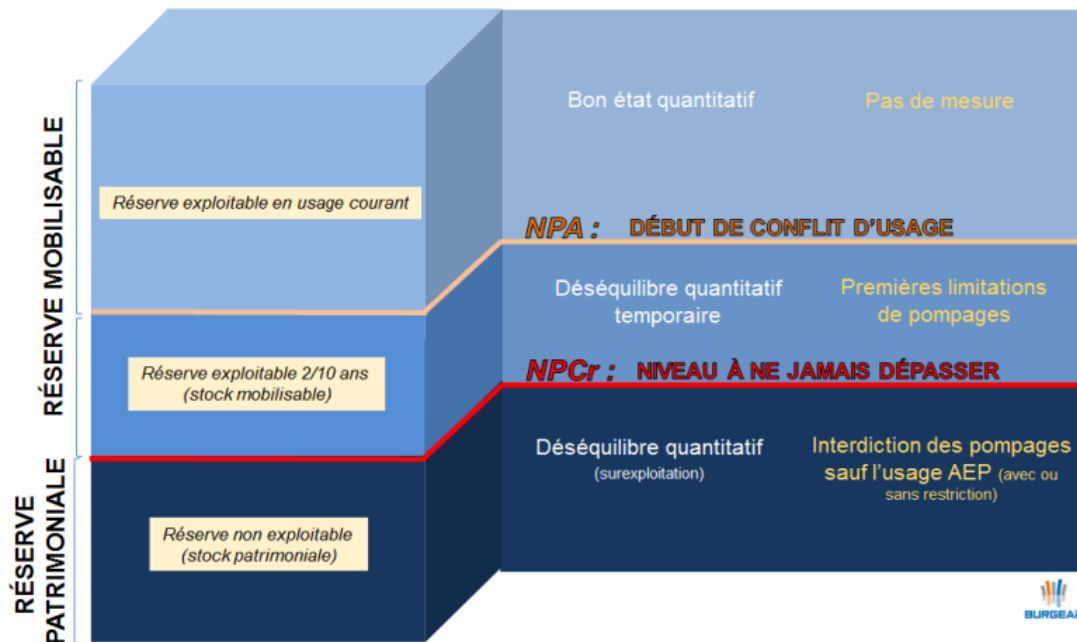


Figure 2 : Schéma des niveaux d'alerte et de crise (EVP Nappe du pays de Gex-Léman)



1.3 Incertitudes sur la méthode d'estimations des Volumes Prélevables

Malgré la pertinence de ces études de volumes prélevables, permettant l'échange entre acteurs dans le but d'avoir une gestion quantitative actuelle et future, celles-ci ont des limites qu'il est important de souligner (Conseil scientifique du comité du bassin Rhône-Méditerranée, 2011). Comme les EVP sur le bassin RMC couvrent un large panel de cas très hétérogènes, la méthodologie ne peut donc pas s'appliquer de manière automatique et demande une certaine souplesse pour s'adapter au cas d'étude. Le premier écueil à éviter est celui du recours automatique à la modélisation sans procéder à une analyse approfondie de l'hydrosystème. De plus, les logiciels de modélisation peuvent être limités en termes de représentation de la réalité, par exemple pour des apports issus de massifs karstiques adjacents. Il arrive alors que des modélisateurs considèrent les valeurs des paramètres issus du calage automatique du modèle plutôt que celles issues de mesures de terrain, afin que leurs résultats soient le plus proches possibles du fonctionnement observé de l'hydrosystème. Les relations nappe-rivière sont en général mal connues et cela influe sur la précision des DOE (Débit Objectif d'Étiage). De plus, les prélèvements ont aussi leur lot d'incertitudes. D'une part la différence entre les prélèvements bruts et nets, n'apparaît que rarement, bien que des estimations et des retours à la nappe sont parfois mentionnés. D'autre part, les prélèvements agricoles et domestiques sont mal connus, sans compter ceux qui sont illégaux. Les premiers nécessitent souvent des approximations en fonction des besoins agricoles et de la surface d'exploitation. Les seconds ne sont pas déclarés soit volontairement, soit parce que leur prélèvement est trop faible ; comme pour les zones hors ZRE où la déclaration n'est pas obligatoire si le prélèvement est inférieur 10 000 m³/an (EVP « Alluvions du Rhône-Péage du Roussillon »).

Il est donc crucial d'instaurer un lien de confiance et de faire comprendre que la réduction des incertitudes via le partage d'informations est dans l'intérêt commun. Parfois la seule résorption du déséquilibre quantitatif ne suffit pas à garantir le bon état puisque des facteurs de pollution anthropique ou naturelle entrent aussi en jeu, tels que le risque d'intrusion saline (Conseil scientifique du comité du bassin Rhône-Méditerranée, 2011).

Les aquifères sont parfois amenés à être simplifiés or la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale est primordiale. Les variabilités temporelles sont, elles aussi, importantes et peuvent se décliner en quatre ordres de grandeur : la variabilité mensuelle, liée aux variations saisonnières ; la variabilité plurimensuelle ; liée aux périodes de hautes eaux et basses eaux, la variabilité interannuelle, liée aux

fluctuations météorologiques ; la variabilité climatique, relative au changement climatique. La réflexion autour des volumes prélevable doit donc tenir compte, par exemple pour les prélèvements saisonniers, de la variation annuelle de la recharge et de l'évolution de celle-ci sur le long terme. Enfin, lors des phases de recharge les flux entrants et sortants du système sont différents de ceux en périodes d'étiage (où apparaissent en général les problèmes quantitatifs et/ou qualitatifs) et répondent à d'autres besoins. Par précaution il est donc plus prudent de ne pas considérer la période de recharge comme pouvant permettre davantage de prélèvements sans études complémentaires (Conseil scientifique du comité du bassin Rhône-Méditerranée, 2011). Ces incertitudes conduisent à ne pas considérer comme « magique » et absolu les chiffres produits par les études. Bien au contraire, cette ambiguïté va être exploitée lors de négociation entre acteurs, chacun voulant satisfaire ses intérêts en exploitant les incertitudes en sa faveur tout comme dans le cas du point T6 dans le bassin versant de la Têt (Molle & Collard, 2024). L'aspect politique influence donc fortement la valeur finale qui sera adoptée pour le volume prélevable, montrant que les sciences naturelles sont un apport fondamental mais néanmoins souvent pas suffisant.

1.4 Impacts du changement climatique sur les estimations des Volumes Prélevables

Le changement climatique influe directement sur les valeurs des volumes prélevables, nécessitant une actualisation de celles-ci. Le premier impact est celui de la baisse des précipitations. En effet, une baisse d'apport en eau signifie inéluctablement une baisse de la recharge qui sans adaptation des prélèvements, peut mener un aquifère vers un état de déséquilibre. L'augmentation de la température accroît également l'évapotranspiration naturelle et donc réduit potentiellement la fraction infiltrée.

Les aquifères côtiers constituent un cas particulier. Du fait de la montée du niveau marin, trois effets indésirables sont à prévoir : les intrusions salines, le rapprochement de l'interface eau douce / eau salée et les inondations. Pour certains aquifères, un biseau salé pourrait progressivement se mettre en place et affecter directement la qualité de la ressource. Pour d'autres plus éloignés de la côte, l'interface avec l'eau salée pourrait se rapprocher, ce qui instaurerait un risque d'intrusions dans des zones qui en étaient auparavant dépourvues. Les inondations quant à elles proviendraient de la montée du niveau de la nappe induit par celui de la mer, réduisant l'épaisseur de la zone vadose et causant ainsi une saturation plus rapide et de potentiels émergence de nappe. Enfin, le troisième impact correspond au changement et à l'augmentation des usages de l'eau. Modifier les utilisations actuelles de l'eau ferait émerger de potentielles pénuries et des conflits d'usages à l'échelle globale (Maréchal & Rouillard, 2020).

1.5 Confusions autour de la notion de Volume Prélevable

La notion de volume « prélevable » peut être associée au concept de « Safe Yield », qui est parfois défini ou établi de manière ambiguë ou incorrecte (Annexe 1). Il est donc indispensable de clarifier cette notion avant de poursuivre notre raisonnement.

Une masse d'eau est souvent considérée comme « surexploitée » lorsque les pompages anthropiques sont plus rapides que la vitesse de renouvellement de la ressource. Autrement dit, lorsque les prélèvements sont supérieurs à la recharge et donc exploitent une partie du stock de l'aquifère. Ce raisonnement mène à deux confusions. La première est que le volume prélevable doit être égal à la part d'eau renouvelable (pour maintenir l'équilibre), donc qu'il doit être égal à la recharge. La seconde, qui en découle, est que plus une recharge est grande plus le volume prélevable le sera aussi.

Ces deux conclusions peuvent être réfutées. L'aquifère sera certes en équilibre si l'on pompe sa recharge, puisque celle-ci est renouvelable, cependant cela signifie que -tendanciellement et en moyenne- tous les flux sortants seront réduits à zéro, puisque l'équivalent (en net) des flux entrants sont pompés. Or supprimer ces flux sortants a de graves conséquences environnementales, sociales et économiques telles que des assèchements (sources, cours d'eau, zones humides, captages peu profonds), une subsidence des sols, ou encore une intrusion saline. La valeur de la recharge n'est pas non plus corrélée avec ce qui est « prélevable », puisque l'on comprend que ce qui peut être

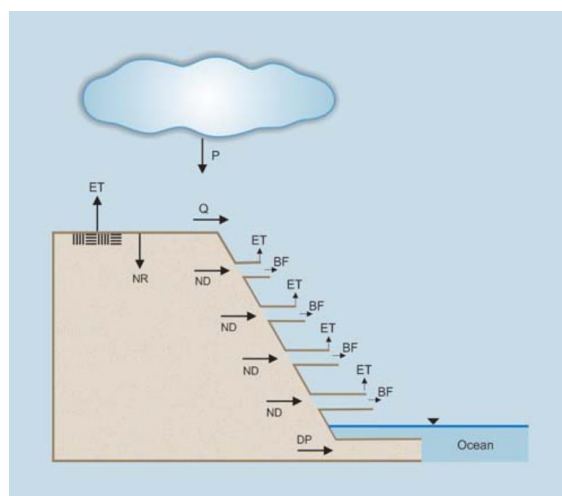
prélevé dépend de ce qui sort et non de ce qui rentre dans l'aquifère (Kalf & Wolley, 2005). Le choix des facteurs limitant est alors d'ordre politique, nécessitant des compromis entre intérêts économiques, écologiques et sociaux.

Une définition qui pourrait correspondre au volume prélevable serait "La quantité d'eau souterraine qui peut être prélevée en toute sécurité d'un bassin d'eau souterraine chaque année, sans produire de résultat indésirable. Les résultats indésirables comprennent, sans s'y limiter, l'épuisement des réserves d'eau souterraine, l'intrusion d'eau de qualité indésirable, la violation des droits d'eau existants, la détérioration des avantages économiques du pompage (tels que les niveaux d'eau excessivement bas, l'augmentation des de pompage et les coûts énergétiques associés), l'épuisement excessif du débit des cours d'eau induit par infiltration et l'affaissement des sols" (Meyland, 2011). D'autres auteurs agrandissent cette liste en prenant en compte « les aspects hydrologiques, écologiques, socio-économiques, technologiques, culturels, institutionnels et juridiques de l'utilisation des eaux souterraines, en cherchant à établir un compromis raisonnable entre des intérêts contradictoires » (Ponce, 2007).

Certains auteurs ont imaginé que le « Safe Yield » pourrait correspondre à un certain pourcentage de la recharge, laissant « suffisamment » de flux sortants pour les facteurs nommés précédemment. « *Le Safe Yield peut également être exprimé en pourcentage de la recharge. L'expérience limitée suggère que les pourcentages moyens peuvent se situer autour de 40 %, les moins prudents autour de 70 % et les raisonnablement prudents autour de 10 %* » (Ponce, 2007). L'origine du 10% est issu de la décomposition de la recharge dans l'espace (Figure 3). Une partie est consommée par évapotranspiration, une autre produit le ruissellement, et enfin une dernière partie (en général la plus faible) percole en profondeur. « *Globalement, si l'on peut supposer que la recharge représente environ 20 % des précipitations, la percolation profonde correspondrait à environ 10 % de la recharge. Par conséquent, une estimation raisonnablement prudente du Safe Yield serait de 10 % de la recharge* » (Ponce, 2007).

En résumé, il est rare que le volume prélevable soit égal à la recharge car il faut maintenir suffisamment de flux sortants pour éviter tout effet inacceptable. Il doit donc être déterminé au cas par cas. Si une valeur prudentielle considère un volume prélevable égal à 10% de la recharge, on est souvent, en pratique et pas seulement dans les aquifères surexploités, à des taux bien plus élevés.

Figure 3 : Schéma de décomposition des précipitations (P) en Evapotranspiration (ET) en ruissellement (Q), en recharge naturelle (NR), en décharge naturelle (ND), en débit de base (BF) et en percolation profonde (DP). (Ponce, 2007)



2 Méthodologie

Après avoir recueilli les 15 études de volumes prélevables sur les eaux souterraines du bassin RMC, nous sommes intéressés à comment la notion de volume prélevable était définie, en comparant quantitativement et qualitativement la méthodologie et les résultats de chaque étude.

2.1 Comparaison quantitative

L'analyse quantitative regroupe les valeurs de recharge, de prélèvement et de volume prélevable en millions de mètres cubes par an (Mm³ /an). La valeur de *recharge* prend en compte tous les apports d'eau que peut recevoir l'aquifère tels que l'infiltration efficace des précipitations, les apports de massifs adjacents, les échanges entre aquifères, la drainance des cours d'eau par l'aquifère ou les recharges anthropiques. La valeur de *prélèvement* encadre tous les prélèvements dans la masse d'eau souterraine pour tous les usages (domestiques, agricoles, industriels). La valeur du volume prélevable représente le résultat de l'étude, il peut représenter la somme des volumes prélevables par secteur ou sa conversion au pas de temps annuel. Ces valeurs sont ensuite comparées par ordre croissant afin de faire ressortir des tendances. Deux rapports ont été calculés. Le premier présente l'effort à faire pour atteindre le volume prélevable par rapport aux prélèvements actuels tel que :

$$\frac{\text{Prélèvements actuels} - \text{Volume prélevable}}{\text{Prélèvements actuels}} * 100$$

Le deuxième montre le rapport du volume prélevable sur la recharge tel que :

$$\frac{\text{Volume prélevable}}{\text{Recharge}} * 100$$

Les comparaisons suivantes ont été réalisées par histogramme sur l'ensemble des 15 EVP : Recharge / Prélèvement, Recharge / Volume prélevable, Prélèvement / Volume prélevable, Efforts à réaliser.

2.2 Comparaison qualitative

L'analyse qualitative compare l'ensemble des aspects qualitatifs relatifs à l'aboutissement de la valeur de volume prélevable. Ainsi les aspects suivants sont pris en compte : critères de volume prélevable, critères de seuils piézométriques, incertitudes, spatialisation, temporalité. Les critères de volume prélevable représentent les facteurs limitants et les effets indésirables provoqués par la surexploitation de la masse d'eau (assèchement, intrusion saline, etc.). Les critères de seuils piézométriques s'appuient sur les effets causés par la variation de la piézométrie pour établir la limite de surexploitation (probabilité, plus bas historique, tendance, connexion aux milieux humides, etc.). Les incertitudes indiquent diverses catégories d'éléments incertains présentés dans les études et la manière dont ils sont pris en compte. La spatialisation permet de voir comment la valeur de volume prélevable est prise en compte dans l'espace (masse d'eau, unité de gestion, amont /aval, etc.). De même, la temporalité renseigne le pas de temps utilisé pour le volume prélevable (mensuel, plurimensuel, annuel)

3 Résultats

Une fois les éléments recueillis, les 15 EVP ont été comparées afin de faire ressortir des axes de réflexion qui ont menés à la définition du volume prélevable. Ces EVP sont réparties sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée-Corse (Figure 4). La surface affleurante des aquifères étudiés s'étend de 0 km² (entièrement captif) à plus de 300 km² et sont majoritairement des aquifères alluviaux (Tableau 1).

Figure 4 : Zone d'étude pour les EVP-eaux-souterraines (Bassin Rhône Méditerranée, 2016)

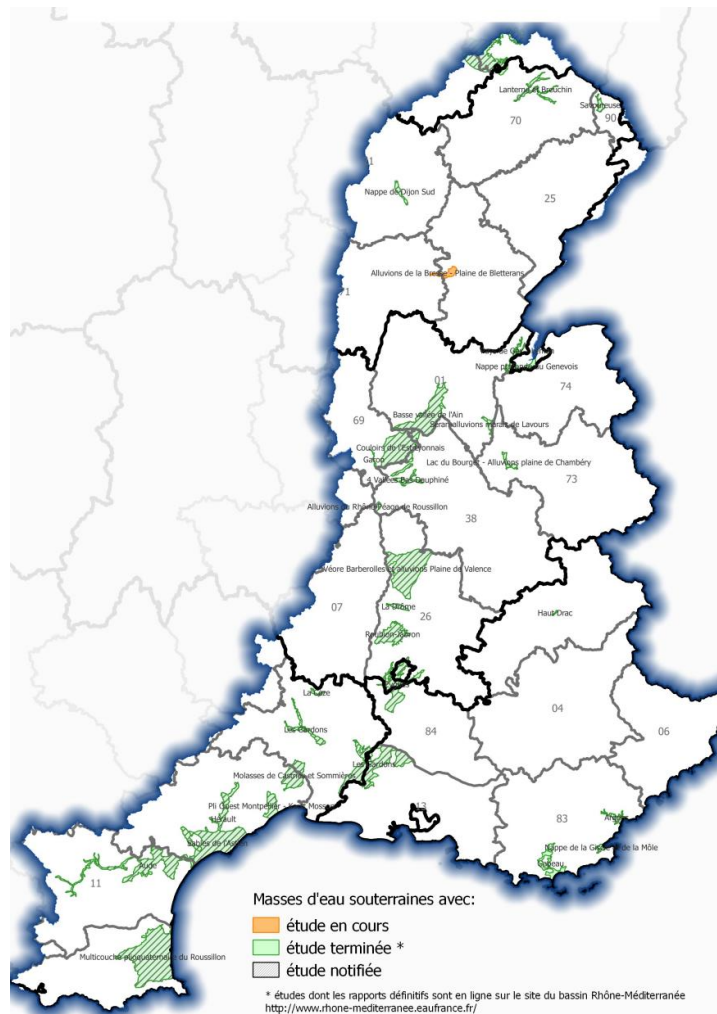


Tableau 1 : Classement des aquifères étudiés par les EVP, selon leur superficie affleurante en fonction de leur géologie. (*Superficie de l'ensemble des bassins versants et non de l'affleurement)

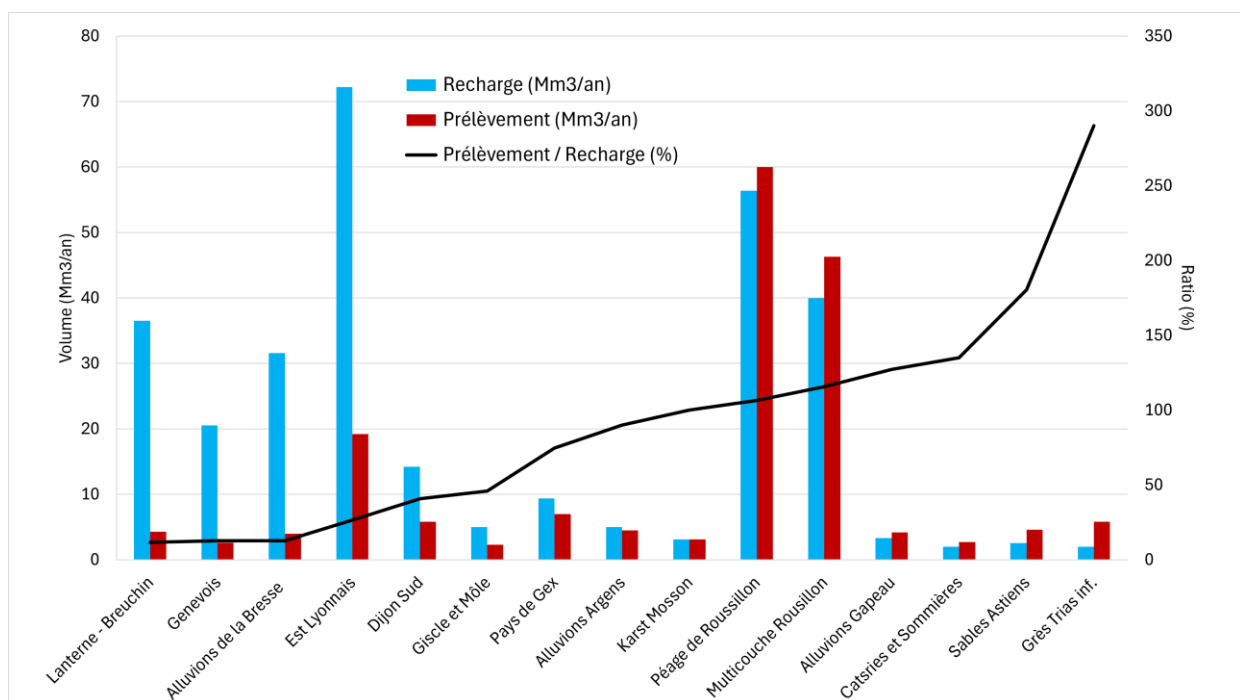
Région	Nom	Type de nappe	Superficie affleurante (km ²)
Auvergne-Rhône-Alpes	Nappe de l'Est Lyonnais	Alluviale	308.6
Auvergne-Rhône-Alpes	Nappe du pays de Gex	Alluviale	298.4*
PACA	Alluvions du Gapeau	Alluviale	98.8
Bourgogne-Franche-Comté	Alluvions de la Bresse Nappes de Bletterans et de la Vallière	Alluviale	47
Bourgogne-Franche-Comté	Lanterne et Breuchin	Alluviale	40
Auvergne-Rhône-Alpes	Alluvions du Rhône - Péage de Roussillon	Alluviale	36.72
PACA	Alluvions Argens	Alluviale	25
Bourgogne-Franche-Comté	Nappe de Dijon Sud	Alluviale	24
PACA	Nappes alluviales Gisclé et Môle	Alluviale	15.4
Auvergne-Rhône-Alpes	Nappe profonde du Genevois	Alluviale	0
Bourgogne-Franche-Comté	Grès du trias inférieur	Grès	85
Occitanie	Multicouche du Rousillon	Alluviale (Q) et fluvio-lacustre (Plio)	80
Occitanie	Pli Ouest de Montpellier - Karst Mosson	Calcaire	20.7
Occitanie	Molasses de Castries et Sommières	Calcaire	13
Occitanie	Nappe des sables Astiens	Lentilles sablo-graveleuses	17

3.1 Résultats quantitatifs

1.1.1 Comparaison entre la recharge et les prélèvements

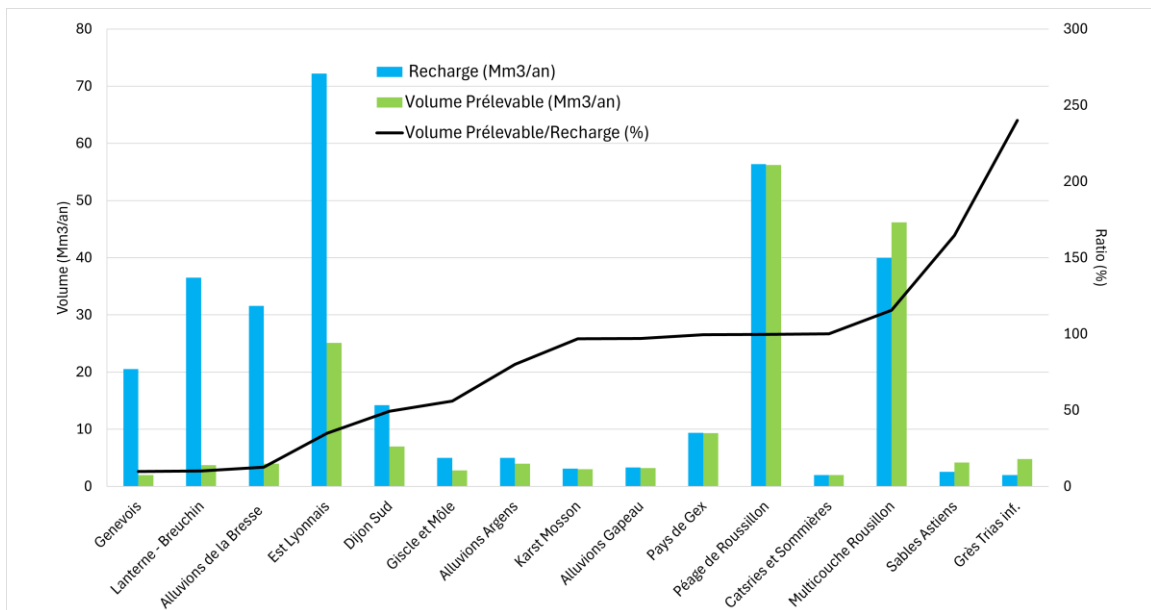
La **Erreur ! Référence non valide pour un signet.** présente les prélèvements et les recharges, classés par ordre croissant du rapport Prélèvement / Recharge en %. Une grande majorité des masses d'eau souterraines bénéficient d'une recharge inférieure à 10 Mm³/an. De plus, presque la moitié des prélèvements (47%) sont supérieurs ou égaux à la recharge, atteignant parfois une exploitation supérieure à 2.5 fois le volume de la recharge. Les volumes prélevés dépassent le volume de la recharge en majorité dans des cas de faible recharge (< 10 Mm³/an).

Figure 5 : Recharge globale et prélèvement (en Mm³/an) pour chaque masse d'eau des EVP sur les eaux souterraines



3.1.1 Comparaison entre la recharge et le volume prélevable

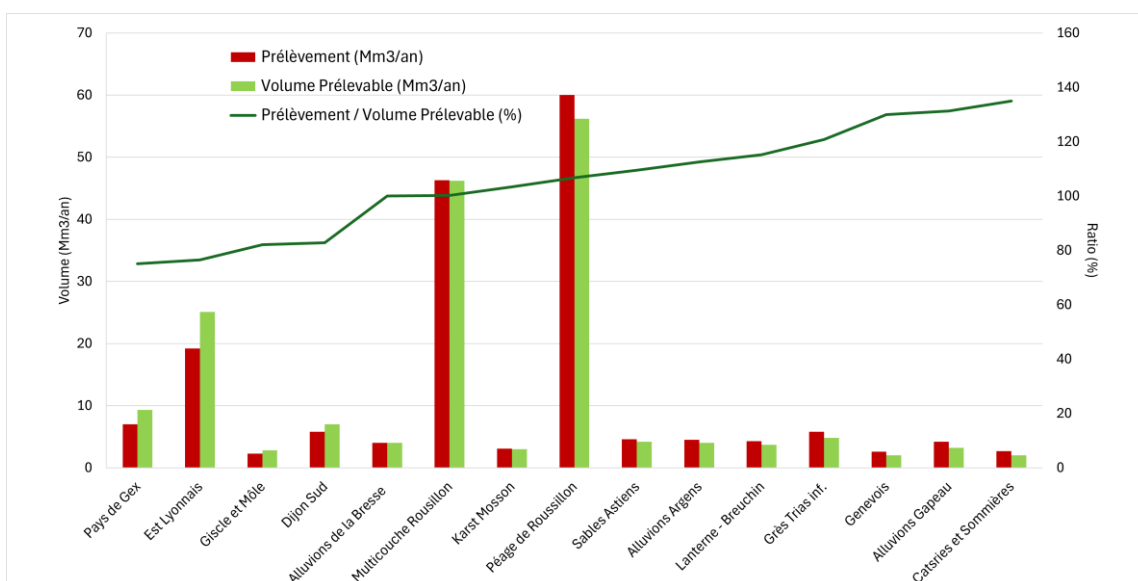
Figure 6 : Recharge globale et volume prélevable (en Mm3/an) pour chaque masse d'eau des EVP sur les eaux souterraines



La Figure 6 compare la recharge et le volume prélevable par un classement par ordre croissant du ratio entre volume prélevable et recharge (en %). Une minorité des masses d'eau souterraines (20%) ont un volume prélevable équivalent à environ 10 % de la recharge. Il est possible de constater un palier sur les 100%, ce qui traduit que plusieurs EVP expriment un volume prélevable qui est équivalent à la recharge. Enfin une dernière partie des EVP indique un volume prélevable supérieur à la recharge, atteignant parfois plus du double de celle-ci (240%).

3.1.2 Comparaison entre le prélèvement et le volume prélevable

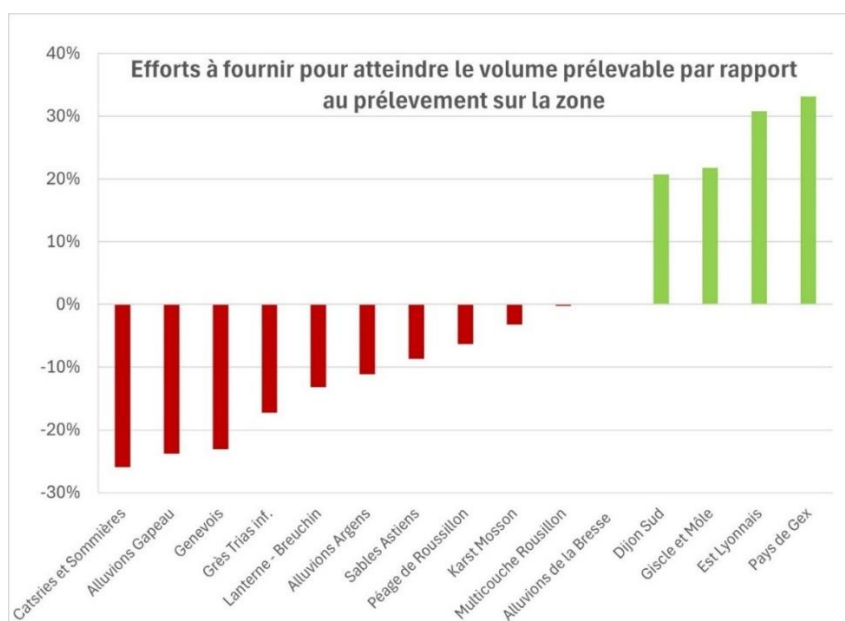
Figure 7 : Prélèvement et volume prélevable (en Mm3/an) pour chaque masse d'eau des EVP sur les eaux souterraines



La Figure 7 met en parallèle les prélèvements et les volumes prélevables selon un classement croissant du ratio Prélèvement / Volume prélevable (en %). Une grande majorité des masses d'eau subissent un prélèvement supérieur ou égal au volume prélevable (73%). Parmi ceux-ci, les prélèvements actuels sont relativement proches de ceux des volumes prélevables (entre 100% et 135%). Notons cependant que l'étude sur les alluvions de la Bresse n'étant pas finie, un volume prélevable n'est pas encore déterminé, le volume prélevable est donc supposé égal aux prélèvements actuels.

3.1.3 Efforts à fournir pour atteindre le volume prélevable

Figure 8 : Rapports du volume prélevable par rapport au prélèvement pour chaque masse d'eau des EVP sur les eaux souterraines



Cette dernière figure (Figure 8) représente les efforts de réduction demandés par masse d'eau. Parmi ces efforts de réduction, 60% ont un effort supérieur à 10% à réaliser. L'augmentation possible des prélèvements pour atteindre le volume prélevable, barres en vert, est indicatif des marges de manœuvre qui existent. Cela ne veut pas dire pour autant qu'il soit souhaitable de se rapprocher de l'équilibre. Notons que les efforts à fournir ne sont pas corrélés à la part d'usage AEP (Annexe 2).

3.1.4 Synthèse de l'analyse quantitative

Les résultats de l'étude comparative quantitative donnent 3 grandes indications. Premièrement, les valeurs de volume prélevable sont très proches de celle de la recharge dans la majorité des cas (Figure 6). Deuxièmement, les prélèvements sont en général assez proches des valeurs de volume prélevable (Figure 7). Troisièmement, pour la grande majorité des masses d'eau souterraines, les prélèvements doivent être réduits pour atteindre le seuil de volume prélevable, avec majoritairement un effort de baisse supérieur à 10% (Figure 8).

3.2 Résultats qualitatifs

Les critères qualitatifs mettent en exergue les choix qui ont été opérés dans chaque étude afin de définir le volume prélevable.

3.2.1 Critères de détermination du volume prélevable et des piézométries de référence

Les critères de volume prélevable sont relativement variables (Figure 9) puisque ceux-ci dépendent du contexte de la masse d'eau. Ceux-ci constituent la base du raisonnement pour arriver à une valeur de volume prélevable et à des niveaux piézométriques de référence. Par ailleurs ce n'est pas toujours le niveau piézométrique qui dicte le volume prélevable.

1. Critère statistique

Deux études utilisent des critères statistiques afin d'obtenir des seuils piézométriques qui, à leur tour, permettent d'obtenir un volume prélevable. L'utilisation de ce critère montre qu'aucun événement catastrophique n'est apparu au cours de l'exploitation de la nappe, le critère d'un niveau à ne pas dépasser 8 années sur 10 est alors utilisé pour définir le bon état.

L'EVP Nappe des sables Astiens utilise des moyennes mobiles (Figure 10) pour exclure les valeurs extrêmes des relevés piézométriques. Une fois ces valeurs lissées, elles peuvent être réparties selon une loi normale, donnant ainsi un intervalle de confiance qui correspond aux critères du NPA. Ce niveau est alors comparé à des simulations piézométriques selon différentes intensités de pompage pour obtenir le volume prélevable.

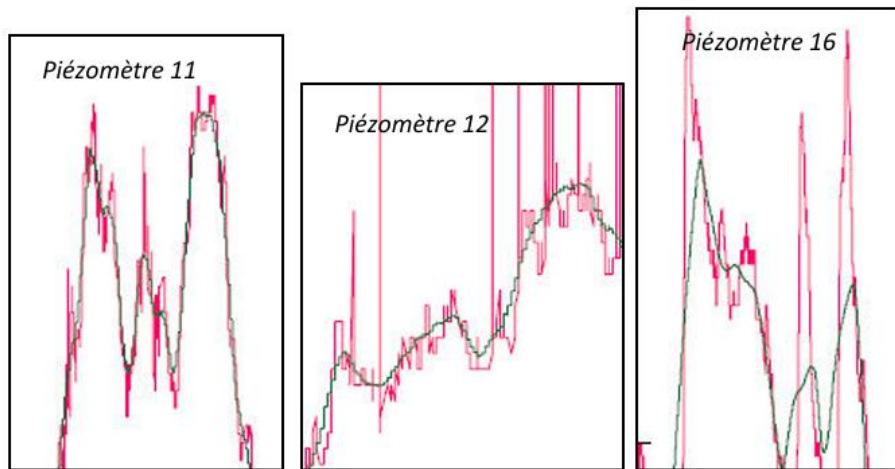
*« Pour ces ouvrages, le principe de définition des NPA consiste donc à considérer que **NPA = niveau moyen – 1 écart type σ** . En prenant comme hypothèse que la répartition des mesures se fait selon une loi normale, cette approche permet d'obtenir un NPA pour lequel 84 % des mesures sont réputées supérieures, et donc de se rapprocher de la définition des NPA (niveau à ne pas dépasser 8 années sur 10). » EVP Nappe des sables Astiens*

*« Le critère de validation du volume prélevable repose sur la **comparaison entre le niveau piézométrique simulé et le niveau de référence défini** pour chaque piézomètre représentatif de **chaque UG**. » EVP Nappe des sables Astiens*

Figure 9 : Méthodologie employée par les EVP en fonction des critères limitants (VP : Volume Prélevable, NP : Niveau Piézométrique)



Figure 10 : traitement des données piézométriques via moyennes mobiles (EVP Nappe des sables Astiens)

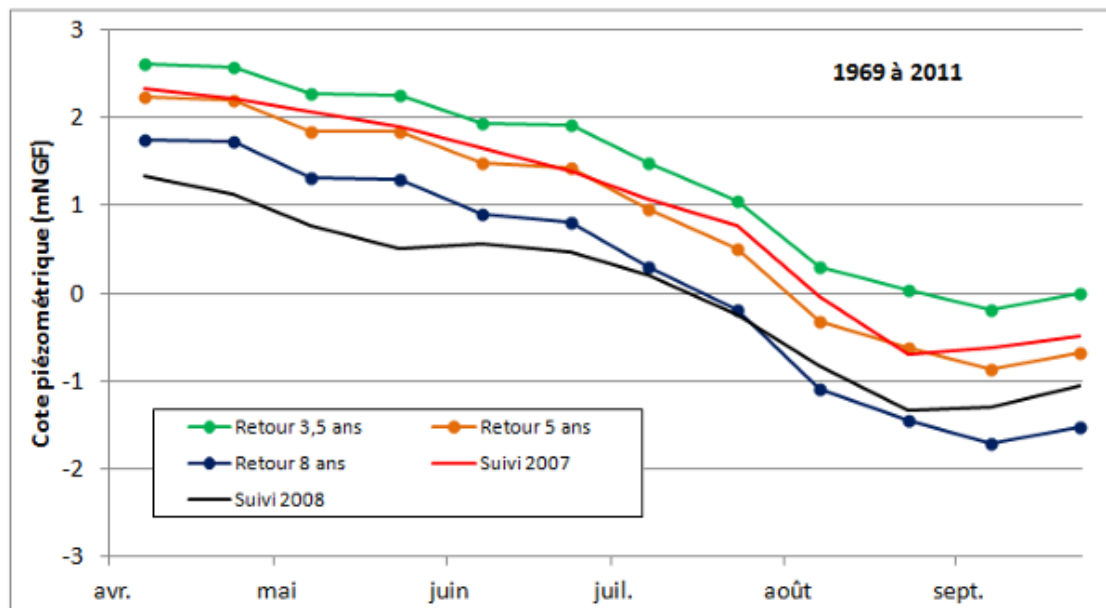


Une autre approche statistique est utilisée pour l'EVP Multicouche Roussillon. Les seuils piézométriques sont définis selon des périodes de retour de niveaux bas (Figure 11). Concernant le volume prélevable de cette étude il n'est pas corrélé avec ces niveaux. En effet, le raisonnement appliqué est plutôt celui d'un critère de stabilité. Les déficits observés semblent se résorber que ce soit à l'échelle saisonnière ou annuelle. La stabilité piézométrique apparente conduit donc le volume prélevable proposé à être équivalent aux prélèvements actuels.

« Le niveau piézométrique d'alerte **NPA** est considéré comme le niveau piézométrique de période de retour 5 ans, alors que le niveau piézométrique de crise renforcée **NPCR** est considéré être le niveau piézométrique de période de retour 8 ans (voir la section 5.5 pour l'origine de ces définitions). Le niveau piézométrique de période de retour 3.5 ans pourrait être considéré comme niveau piézométrique de vigilance. » EVP Multicouche du Roussillon

- Les **déficits saisonniers** actuellement observés du fait de l'augmentation saisonnière des prélèvements, en particulier dans les secteurs de la Salanque et de la bordure côtière Nord, **semblent se résorber durant la période hivernale suivante.**
- Les **déficits annuels** observés en cas de baisse de la recharge sur une ou quelques années **semblent être récupérés** lors des années pluviométriques normales et excédentaires.
- **Les volumes prélevables** sur les nappes pliocènes **correspondraient donc aux volumes actuellement prélevés** qui sont de 46 Mm³/an, en se basant sur les chiffres collectés. » [Manque de connaissances] EVP Multicouche du Roussillon

Figure 11 : minima piézométrique pour les périodes de retour 3,5, 5 et 8 ans (EVP Multicouche du Roussillon)



2. Critère écologique

Dans le cas des nappes alluviales, un critère écologique peut s'intégrer au NPA et NPCr. En effet, ces nappes sont en général connectées aux cours d'eau locaux et peuvent alors les drainer ou être drainées par eux (Figure 12). Dans cette configuration (échange nappe-rivière), l'instauration d'un DOE est nécessaire et celui-ci est contrôlé par le Débit Minimum Biologique (DMB) des cours d'eau concernés. Le volume prélevable est alors pensé de manière à respecter le DOE.

Dans le cas de l'EVP Lanterne Breuchin, l'approche visée était de faire corrélérer le débit et le niveau piézométrique, cependant la corrélation n'était pas suffisamment bonne et a demandé une approche basée sur des niveaux historiques. Les volumes prélevables sont quant à eux directement liés au DOE.

« On se rend compte que pour un débit de cours d'eau donné, le niveau de nappe dans les piézomètres proches peut être très variable. » EVP Lanterne Breuchin

« Ainsi, il apparaît délicat de fixer un niveau piézométrique d'alerte ou de crise en comparant ce niveau directement au débit du cours d'eau. »

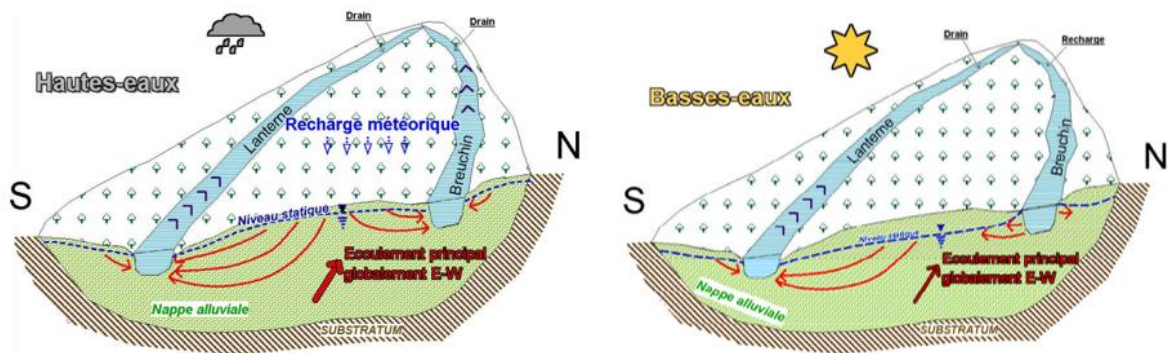
Nous proposons donc en paragraphe suivant une approche statistique des chroniques piézométriques qui nous apparaît complémentaire et permettant une approche plus fiable à long terme. » EVP Lanterne Breuchin

« Il est proposé pour la fixation des NPA et NPCr, de retenir le niveau de nappe au 1er juillet. Le niveau d'alerte retenu est celui de l'arrêté cadre de 1996, soit 254.2 m NGF. » EVP Lanterne Breuchin

« Si le volume Vecoul est supérieur à la valeur maximum des volumes mensuels prélevés historiquement (sur les années 2003 et 2009 et sur l'année « fictive » de prélèvement maximal pour chaque usage), alors c'est la valeur maximum des volumes mensuels prélevés historiquement qui est retenue comme valeur de volume prélevable ;

Si le volume Vecoul est inférieur à la valeur maximum des volumes mensuels prélevés historiquement, alors c'est la valeur de volume Vecoul qui est retenue comme valeur de volume prélevable ; » EVP Lanterne Breuchin (Vecoul : volume s'écoulant sur le tronçon hors besoins du milieu naturel et garantissant éventuellement les usages à l'aval)

Figure 12 : Schéma de la connexion nappe-rivière selon la période (EVP Lanterne Breuchin)



Dans le cas de Dijon, le respect du DMB passe d'abord par un volume prélevable issu de modélisations, qui ensuite donne les seuils piézométriques de gestion.

« On observe que le respect de la règle de satisfaction d'un Débit d'Objectif d'Etiage 8 années sur 10 impliquerait de retenir un **Débit Cible de 170 l/s** à la station hydrométrique de la Cent Fonts avec un **volume prélevé annuel de 6 Mm³**. Rappelons que le **Débit Minimum biologique cible a été estimé à 170 l/s** ; avec une telle politique de prélèvement, il serait théoriquement **respecté pour 80% des étiages**.
 » EVP Nappe de Dijon Sud

Une variante du critère écologique concerne le bon état des zones humides ou des habitats prioritaires (forêt alluviale), sont alimentés par une nappe, les volumes prélevables sont directement influencés par le nombre de jours de connexion entre la nappe et le système racinaire, nécessaire à leur maintien biologique (Figure 13). Dans cette configuration ce sont les seuils piézométriques qui définissent la valeur du volume prélevable.

« Le **NPCR** fait intervenir la notion de **survie des espèces**. » EVP Alluvions du Rhône-Péage du Roussillon

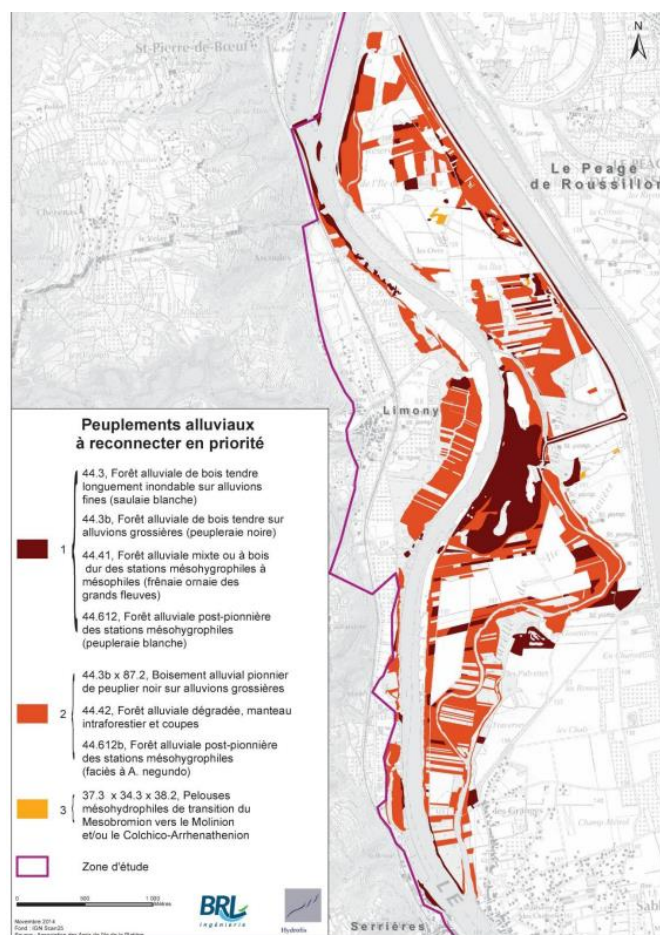
« Le niveau piézométrique d'alerte doit être envisagé comme un niveau d'alerte en cas de niveaux de nappe bas, quand ce niveau est observé sur une période prolongée (plus de 15 jours, en accord avec le seuil de tolérance proposé pour les habitats superficiels). La valeur des NPA dépend bien évidemment de l'ambition que l'on se fixe en termes de **pourcentage de connectivité à garantir pour les milieux durant la période de végétation**. » EVP Alluvions du Rhône-Péage de Roussillon

« Ces volumes prélevables ont été **déduits sur le seul critère de la moindre influence sur une forêt alluviale de qualité remarquable**. A ce sujet, on ne peut pas considérer que le territoire souffre d'un manque d'eau ; ce sont les modalités de prélèvement, en particulier dans la nappe, qui impactent les milieux. » EVP Alluvions du Rhône – péage de Roussillon

[En parlant du NPA] « ce niveau doit aussi garantir le bon fonctionnement quantitatif ou qualitatif de la ressource souterraine et des cours d'eau qu'elle alimente, dans le **respect des DOE cours d'eau**. » EVP Nappe du pays de Gex-Léman

[En parlant du NPCr] « la cote du niveau de la nappe au-dessous de laquelle est mise en péril la **survie des milieux aquatiques** qu'elle alimente, dans le **respect des DCR**. » EVP Nappe du pays de Gex-Léman

Figure 13 : Cartographie des habitats à reconnecter en priorité à la nappe (EVP Alluvions du Rhône - Péage de Roussillon)



3. Critère de salinité

Un autre cas particulier est celui des aquifères côtiers (EVP Alluvions du Gapeau) ou des géologies salifères (EVP Pli Ouest de Montpellier – Karst Mosson). En effet, ceux-ci sont sujets au risque d'intrusion saline (Figure 14). Des mesures de teneurs en chlorure ou de conductivité électrique peuvent être alors réalisées pour servir de critères limitants. Pour ce critère, la conductivité électrique est associée à un niveau piézométrique (Figure 15), celui-ci devient alors un seuil de référence qui conditionne par la suite la valeur du volume prélevable.

*« Ce niveau a été défini à partir des **chroniques piézométriques et de conductivité électrique**. Pour des niveaux inférieurs ou égaux à 1 m NGF, la **qualité de la ressource n'est pas assurée**, la conductivité électrique augmentant jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur certains captages. [...] Ainsi, le Niveau Piézométrique de Crise Renforcé (**NPCR**) est fixé à 1 m NGF (Illustration 57). »* EVP Pli Ouest de Montpellier-Karst Mosson

*« Le modèle utilisé en mode prévisionnel à partir de différents scénarios climatiques et de prélèvements a permis de définir les volumes prélevables sur le compartiment Sud. Il est ainsi égal à 3.10⁶ m³/an. En effet **ce volume** prélevé permet de **conserver un niveau piézométrique supérieur ou égal au NPA** et donc une **bonne qualité de la ressource**. »* EVP Pli Ouest de Montpellier – Karst Mosson

*« Les chroniques de données disponibles permettent de définir les conditions externes (pluviométrie, débit du Gapeau) et **internes (piézométrie, salinité)** du déficit quantitatif de l'aquifère constaté lors des deux dernières sécheresses de 1989-1993 et 2002-2008. **Les seuils d'alerte et de crise sont définis à partir de ces conditions.** »*

Figure 14 : Cartographie de l'intrusion saline (EVP Alluvions du Gapeau)

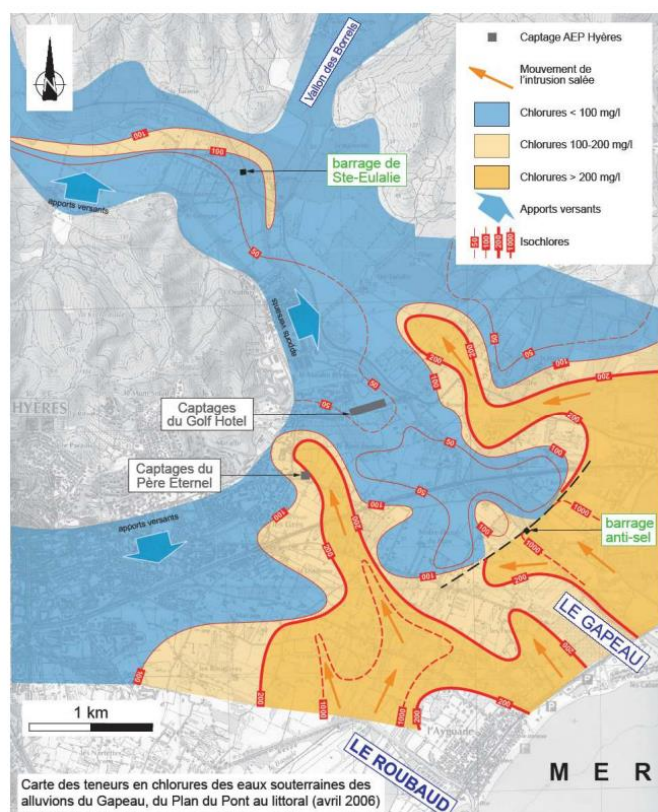
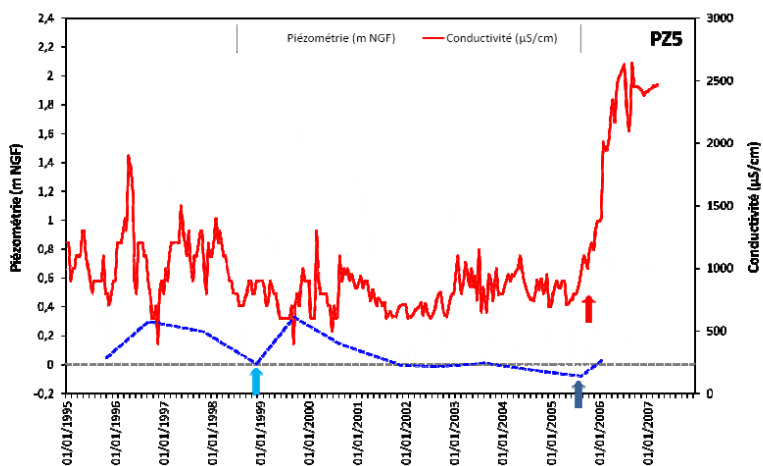


Figure 15 : Corrélation du niveau piézométrique et de la conductivité électrique (EVP Alluvions du Gapeau)



4. Multicritère

Certains utilisent plusieurs critères afin de définir soit leurs seuils piézométriques pour définir leur volume prélevable ou inversement leur volume prélevable puis leurs seuils piézométriques.

Dans le cas de l'EVP Argens, le seuil d'alerte est encadré par la salinité, le débit du fleuve et le déficit pluviométrique, le seuil de crise est uniquement régi par la salinité.

« - **teneurs en chlorure des eaux souterraines** mesurées au niveau des piézomètres F24B et F25B situés entre les captages et le stock d'eau salée, par rapport au bruit de fond de la nappe, le bruit de fond de la nappe étant à mesurer par 2 piézomètres à créer en zone non influencée en amont du captage le plus amont :

o alerte : +100 mg/l pendant 12 mois ;

o crise : +200 mg/l pendant 6 mois ;

- **Ratio** à partir du **débit du fleuve Argens** (à mesurer à la station de Roquebrune sur-Argens) :

$$R = \frac{QMNA5}{QMM}$$

o alerte : $R > 1$ pendant 3 mois

- **déficit pluviométrique mensuel cumulé** (pluies mesurées à la station de Fréjus plage) : o alerte : alerte : à partir de 50% » EVP Argens

Pour l'EVP Couloirs de l'Est lyonnais les critères choisis sont les bases crépinées de captages AEP nécessaire à leur bon fonctionnement et la survie des milieux aquatiques (Figure 16).

« La méthode de détermination du **NPCR est basée sur les seuils critiques de fonctionnement des captages d'intérêt majeur pour l'alimentation en eau potable et/ou la survie des milieux aquatiques sur les secteurs environnementaux en liens avec la nappe fluvio-glaciaire (secteur de l'Ozon).** » EVP Couloirs de l'Est lyonnais

Enfin la salinité et les assecs forment les critères de l'EVP Nappes de la Giscle et de la Môle. Les assecs sont modélisés sans influence anthropique (c'est-à-dire sans captages). Une fois ces assecs de référence obtenus pour chaque mois, les modélisations ont pour but de fournir une intensité de pompage (m³/an) pour reproduire cet état « naturel » (Figure 17) sachant que des barrages soutiennent désormais ces assecs via des débits réservés. Une fois le volume déterminé (volume prélevable), celui-ci sert à déterminer les seuils piézométriques selon un respect de ce niveau 8 années sur 10 (Figure 18).

« - **la stabilisation du biseau salé et de la poche saumâtre ;**

- **un développement maîtrisé des assecs dans les cours d'eau.** »

[Les deux critères à respecter pour le VP] EVP Nappes de la Giscle et de la Môle

« **L'étendue des assecs** peut être considérée comme le **critère de référence** pour déterminer les volumes prélevables en relation avec les NPA. » » EVP Nappes de la Giscle et de la Môle

Figure 16 : Niveau piézométrique à maintenir en fonction des zones humides et des forages AEP (EVP Couloirs de l'Est lyonnais)

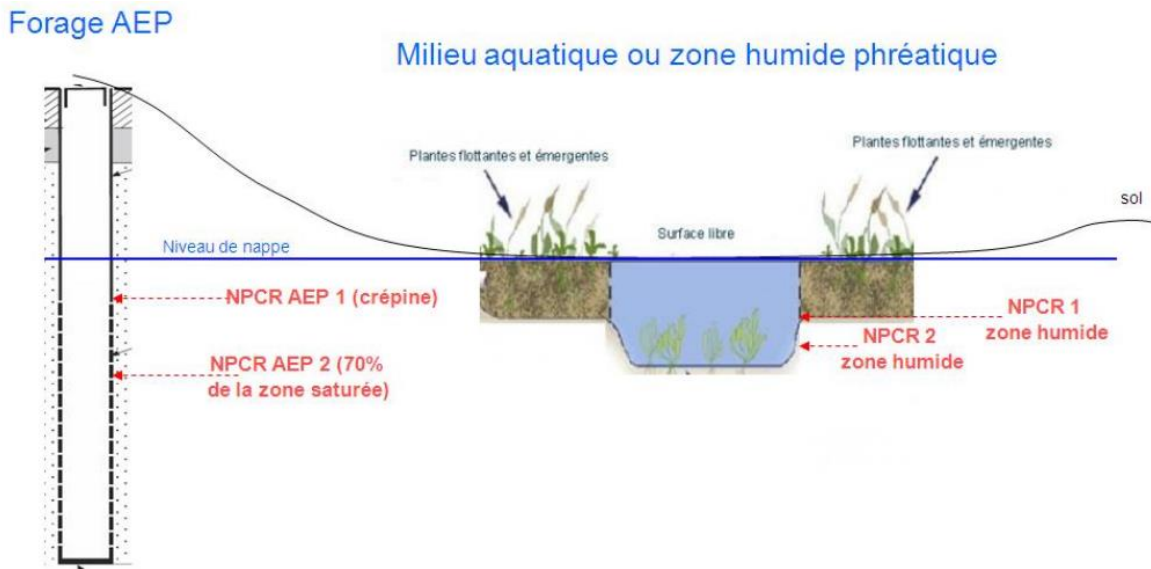


Figure 17 : Simulation des assecs selon les volumes prélevés (EVP Nappes de la Giscle et de la Môle)

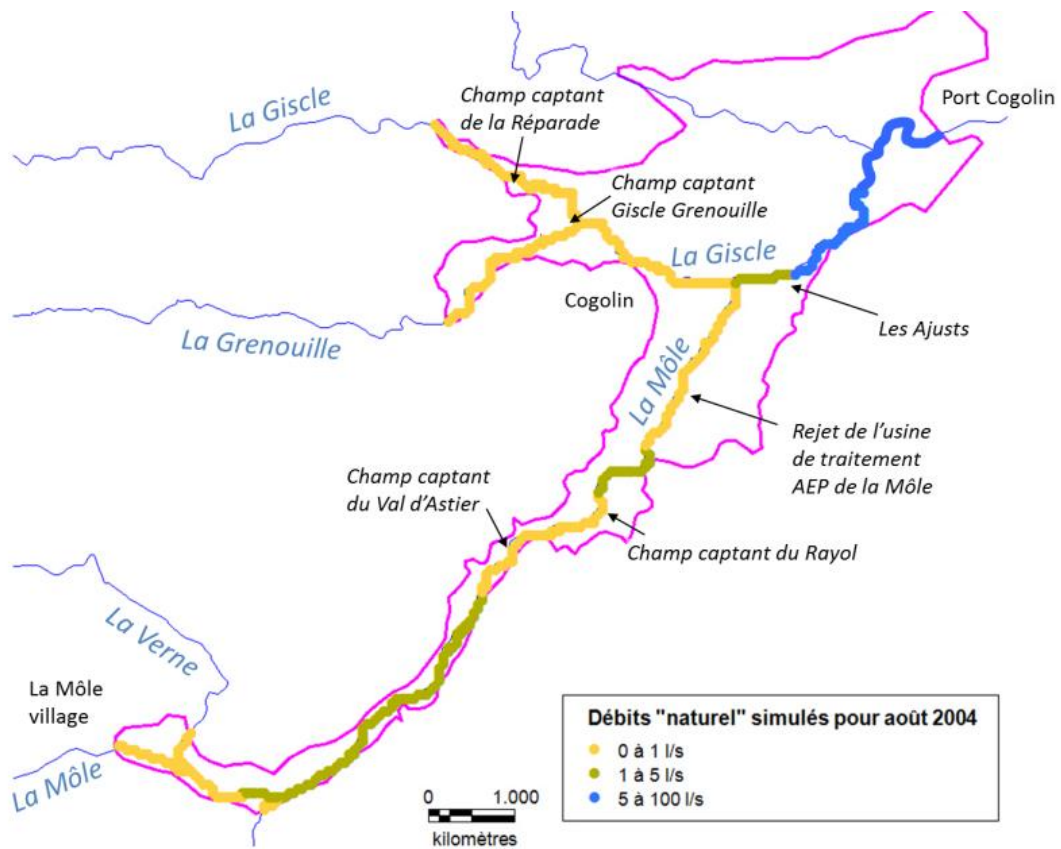
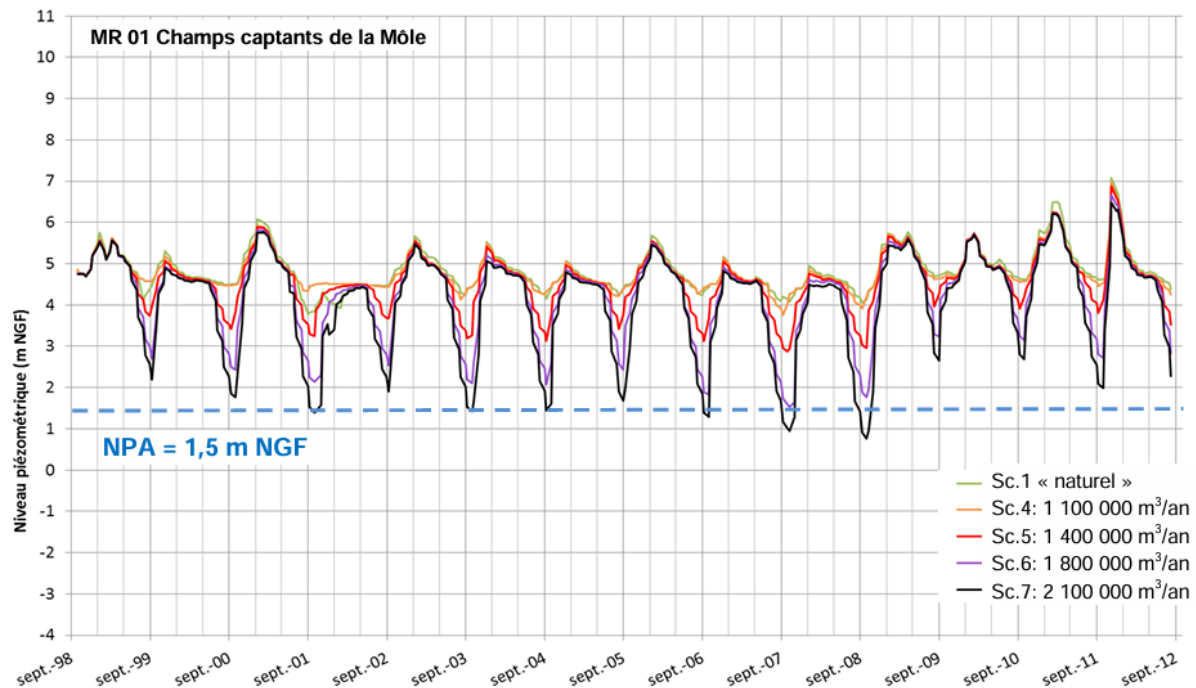


Figure 18 : Comparaison de simulations entre un état « naturel » sans pompage, et différents scénarios de prélèvement (EVP Nappes de la Giscle et de la Môle). Ici le NPA correspond au niveau minimal atteint au cours de l'année sèche de récurrence 8 années sur 10 (ici 2004) pour les scénarios de prélèvement en adéquation avec la conservation du « bon état du milieu et satisfaction des usages 8 années sur 10 ».



5. Critère de stabilité

Les critères de stabilité servent à maintenir les volumes prélevables proches des prélèvements actuels. Trois phénomènes peuvent expliquer cette volonté de stabilisation : la manque de connaissances, l'impossibilité de faire machine arrière, ou une vision erronée du concept de « Safe Yield ».

Le manque de connaissances conduit à maintenir les prélèvements actuels en les considérant comme volume prélevable. Ce cas est illustré par les prélèvements autres que l'AEP pour l'EVP Nappe du pays de Gex-Léman :

« Pour les prélèvements destinés à d'autres usages que l'AEP dans les eaux souterraines, compte-tenu des faibles connaissances de ces prélèvements, nous proposons un volume maximum prélevable égal aux prélèvements actuels (prélèvement de 2010). » EVP Nappe du pays de Gex-Léman

Dans le cas du retour impossible celui-ci est lié à la trop forte anthropisation par rapport à la zone. Le cas des Grès du Trias Inférieur illustre cette marche arrière impossible à cause de la configuration de l'aquifère qui ne laisse passer qu'une faible recharge pour la zone Sud-Ouest de la ZRE. Un transfert des prélèvements, occasionnant une réduction des pressions sur cette zone, vise à atteindre la stabilité piézométrique. Le volume prélevable est donc configuré en fonction de cette stabilité piézométrique. La tendance ne pouvant être inversée le niveau d'équilibre est ainsi considéré comme acceptable.

« Les résultats d'une deuxième série de simulations montrent enfin que les tendances d'évolution à la baisse des niveaux piézométriques de la nappe captive seraient fortement ralenties, voire enrayerées, par l'effet des mesures de réduction des prélèvements et notamment par l'effet d'une réduction 1 Mm³/an dans le secteur sud-ouest (Vittel Contrexéville, au sud de la faille de Vittel). Cette réduction ne serait toutefois pas suffisante pour inverser les tendances d'évolution : la nappe captive des grès dans le

département des Vosges ne se reconstituerait pas, mais elle se maintiendrait à un niveau compatible avec une exploitation raisonnée. » EVP Grès du Trias Inférieur

Le cas de Dijon présente un autre exemple de retour en arrière impossible, celui-ci s'applique en situation de crise. Bien que cet aquifère ait un volume prélevable supérieur aux prélèvements actuels, l'analyse révèle que du fait de sa forte dépendance à l'AEP (> 90%), les réductions seraient très limitées en cas de crise.

« faible marge de réduction des prélèvements, et donc de possibilité de réaction, en cas de crise » car « En effet, 90% des prélèvements sont destinés à l'AEP et leur réduction en période de sécheresse prononcée ne pourrait être envisagée que par une politique d'approvisionnements exceptionnels à partir d'autres bassins versants. Or, il est probable que ceux-ci subissent aussi des restrictions liées à cet état de sécheresse que l'on peut supposer au minimum régional. » EVP Nappe de Dijon Sud

Enfin une conception erronée du « Safe Yield » induit à considérer le volume prélevable comme égale à la recharge. Le cas de Castries illustre ce phénomène en arrivant à la conclusion que le volume prélevable doit être de 2 Mm³/an or la recharge est de 2 Mm³/an. Notons que pour arriver à cette valeur de volume prélevable les incertitudes et les intervalles ont été pris au plus haut afin de maximiser la valeur. Une fois ce volume calculé, celui-ci est utilisé dans des modélisations pour connaître les seuils piézométriques à respecter pour correspondre à ce volume.

[Castries] « Depuis, l'exploitation de la molasse a asséché la source de Fontmagne. » EVP Molasses de Castries et Sommières (1^{er} impact négatif, comme on ne peut pas revenir en arrière, on l'accepte)

[Castries] « On constate que le critère Meso est vérifié pour les scénarii de prélèvement compris entre 0.7 et 1.6 Mm³/an, avec une période de calcul statistique de 30 ans. Le critère Meso n'apparaît plus vérifié lorsque les prélèvements annuels deviennent supérieurs à 1.6 millions de m³/an. »

[Castries] « Nous considérons que le Ratio [Meso] est entaché d'une incertitude minimale de 20 % puisque l'incertitude relative de chacune des variables est de l'ordre de 10 % au moins. Cette incertitude sur le graphique du bilan hydrogéologique (Illustration 57) correspond à une incertitude absolue de ± 400 000 m³/an. En considérant la gamme d'incertitude du critère Meso (Illustration 57), les prélèvements annuels inférieurs ou égaux à 2 millions de m³/an permettraient de satisfaire le critère du bon état quantitatif de l'entité 556B2. » EVP Molasses de Castries et Sommières

3.2.2 Incertitudes et ambiguïtés

Les méthodes utilisées et les résultats de ces études présentent des zones d'incertitude et d'ambiguïté. On peut distinguer les incertitudes physiques, les incertitudes de données, les incertitudes liées aux prélèvements anthropiques et les incertitudes de modélisation.

Les incertitudes physiques sont relatives aux caractéristiques morphologiques de l'aquifère. Elles regroupent les hypothèses de connexion hydraulique (échange nappe-rivière ou connexion entre aquifère) ou des manques d'informations pour le bilan hydrogéologique (entrées ou sorties non déterminées).

« Le comportement hydrogéologique de la nappe profonde reste pour partie inconnu :

-Destination des eaux souterraines vers le Sud.

-Eventuels échanges avec les marno-calcaires oligocènes ou les calcaires jurassiques. » EVP Nappe de Dijon Sud

« Cependant, la méconnaissance des flux de sortie de l'aquifère au sein notamment de la gouttière synclinale de Junas-Aubais ne permet pas d'établir de bilan hydrogéologique fiable. » (Sommières) EVP Molasses de Castries et Sommières

« Cependant certains termes restent largement méconnus, en particulier les échanges entre cours d'eau et nappes. Au final la précision du bilan n'est pas suffisante pour statuer précisément sur

l'équilibre ou le déséquilibre du bilan et donc du système plio-quatenaire. » EVP Multicouche du Roussillon

Ensuite, les incertitudes de données concernent les valeurs récoltées sur le terrain ou via d'autres études. Celles-ci encadrent les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, les valeurs relevées (prélèvements bruts ou nets, pompages illégaux ou non déclarés, débit d'étiage, etc.) ou encore les dysfonctionnements de sondes.

« En l'absence de chroniques suffisamment longues, il est parfois difficile de fixer, pour certains points de contrôle, des niveaux de référence "nappe haute et nappe basse" et/ou des débits d'étiage significatifs. » EVP Nappe du pays de Gex -Léman

« la surface piézométrique de la nappe ne peut pas être connue très précisément, mais à quelques mètres près seulement. » EVP Grès du Trias Inférieur

« Rappelons que nous ne disposons pas de données suffisantes pour argumenter de façon certaine les proportions respectives entre ces apports : nappe alluviale de l'Ouche ou/et nappe karstique des formations carbonatées du Jurassique. » EVP Nappe de Dijon Sud

« Le piézomètre de Breuches retenu en première approche ne sera pas suffisant pour couvrir la vallée du Breuchin et de la Lanterne. Par ailleurs le piézomètre est situé sur la zone de divergence entre les 2 rivières, c'est à dire qu'il caractérise le comportement moyen de la nappe au droit de l'interfluve. » « Seul le piézomètre de Breuches semble utilisable pour une utilisation en NPA et NPCR » [1 seul piézomètre pour 2 nappes] EVP Lanterne Breuchin

Les incertitudes peuvent aussi être liées aux prélèvements anthropiques. En effet, la déclaration obligatoire est soumise à des seuils minimaux ce qui peut laisser échapper une partie des informations relatives aux volumes extraits. Certaines EVP estiment aussi que ces prélèvements représentent un volume trop faible et sont donc négligés.

« Le seuil de déclaration s'élevant à 10 000 m³/an (hors Zone de Répartition des Eaux), les prélèvements inférieurs à ce seuil échappent au recensement (il existe cependant des cas minoritaires de déclaration volontaire). » EVP Alluvions du Rhône-Péage de Roussillon

« le seuil de perception de la redevance est passé de 30 000 m³/an à 10 000 m³/an hors Zone de Répartition des Eaux (et 7000 m³/an en ZRE), à partir de 2008. » EVP Argens

« Hors Zone de Répartition des eaux (c'est le cas sur le périmètre d'étude), les prélèvements dans un cours d'eau ou dans sa nappe d'accompagnement sont soumis à une procédure de déclaration si sa capacité totale maximale est comprise entre 400 et 1 000 m³/h ou entre 2 et 5% du débit du cours d'eau et à une procédure d'autorisation si sa capacité est supérieure à 1 000 m³/h ou à 5% du débit du cours d'eau. » EVP Alluvions du Rhône- Péage de Roussillon

« Il faut noter ici que les prélèvements domestiques n'ayant pas été intégrés dans la conception du modèle, la méthodologie retenue a sur ce point a tendance à surestimer le volume prélevable. » EVP Nappe des sables Astiens

Enfin, les erreurs relatives aux calculs et aux modèles sont parfois prises en compte dans les études. En effet, il est possible d'observer des tests de sensibilité du modèle (assez rarement), des tests de cohérence entre les valeurs simulées et mesurées (relativement souvent) ou des valeurs, données avec des incertitudes relatives ou absolues.

« Une fois le modèle construit, nous réaliserons une série de tests paramétriques pour appréhender la sensibilité du modèle aux principales inconnues identifiées » EVP Nappe de Dijon Sud

« Le but ici est de faire correspondre du mieux possible la piézométrie simulée avec les mesures réalisées sur le terrain. Mais à l'échelle de la nappe de l'Astien, il n'est toutefois pas possible de caler exactement l'ensemble des points avec une bonne précision, sans remettre en cause les bases conceptuelles du modèle. C'est pourquoi la cohérence globale de la piézométrie à l'échelle du modèle

a été privilégiée plutôt que l'adéquation des valeurs simulées avec les mesures de terrain. » EVP Nappe des sables Astiens

3.2.3 Prise en compte de la temporalité

De manière générale, les volumes prélevables sont définis de manière annuelle et mensuelle. Cependant, certains cas distinguent des périodes entre les deux (plurimensuelle), comme pour les périodes de hautes eaux et basses eaux ou encore selon le type de l'année (sèche ou humide) en fonction de l'apport pluviométrique.

« Nous proposons de retenir **comme volume prélevable 351 500 m3 en année moyenne** avec des prélèvements variant entre **2 393 m3/jour en hautes eaux** et entre **193 et 293 m3/jour en situation d'étiage "normal"**. » (ex pour Captages Cerisiers) EVP Nappe du pays de Gex-Léman

« En effet, l'attribution d'un volume de 300 000 m3 destiné à l'irrigation et concentré sur les cinq mois d'été peut paraître excessive au regard des pratiques actuelles. **On a donc cherché à connaître quel volume prélevable en période estivale pour l'irrigation serait compatible avec le maintien d'un Débit Minimum Biologique de 170 l/s et l'atteinte d'un volume prélevable global de 7 Mm3.** » EVP Nappe de Dijon Sud (maximisation de la valeur du VP en jouant sur la temporalité des prélèvements)

« La gestion annuelle proposée distingue **4 périodes pluri-mensuelles**, chaque période étant **caractérisée par un volume global maximum et un volume mensuel maximum** qui doivent permettre de maintenir l'aquifère en excédent quantitatif » EVP Argens

De plus, l'exploitation des nappes et leurs mesures doivent tenir compte de l'inertie de celles-ci.

« La **réponse de l'écoulement** en provenance des calcaires jurassiques dit « de la Mosson » (compartiment Nord) présente **un caractère très inertiel** » EVP Pli Ouest de Montpellier – Karst Mosson

« Ainsi, tout prélèvement dans ces nappes des terrasses aura un **impact quantitatif** sur le cours d'eau, mais **différé dans le temps**, et ce jusqu'à **plusieurs mois**. Comme ces nappes des terrasses ne contiennent pas des volumes importants d'eau (nappes de faible épaisseur), elles peuvent être **facilement surexploitées jusqu'à leur épuisement, mais également facilement reconstituées** avec les recharges suivantes » EVP Multicouche du Roussillon

3.2.4 Prise en compte de la spatialité

La spatialité est un paramètre important pour les volumes prélevables et celle-ci peut être déterminée selon divers critères. Deux grandes tendances existent, le volume prélevable pour une masse d'eau et le volume prélevable propre à plusieurs secteurs (Figure 19). Dans le cas de la masse d'eau, le choix est réalisé via des délimitations de grandes entités géologiques ou selon le système d'alimentation de l'aquifère. Dans le cas de la sectorisation, les raisons peuvent être liées à l'étendue ou la vulnérabilité de la zone, aux modes de gestion, aux pressions qui y sont exercées, ou encore à l'hétérogénéité hydrogéologique ou piézométrique.

« De façon plus fondamentale, la sectorisation proposée par BURGEAP intègre les aires d'influence des principaux captages. Nous préférons substituer à cette logique, **une logique plus hydrogéologique en intégrant les grandes zonalités en matière d'alimentation latérale, de limites hydrogéologiques** (cf. chapitre relatif à la géométrie du réservoir). » EVP Alluvions du Rhône - Péage de Roussillon

« Il faut définir un certain nombre de points de suivis piézométriques, déjà instrumentés ou si possible équipables, qui soient représentatifs des écoulements souterrains des **unités aquifères du bassin**. » EVP Nappe du pays de Gex-Léman

« Suite à l'analyse **par inter-comparaison des évolutions piézométriques** des différents piézomètres, une sectorisation peut être proposée. » EVP Multicouche du Roussillon

« La méthodologie destinée à délimiter ces **unités de gestion** repose donc sur deux phases :

- **analyse multi-critère** basée sur le fonctionnement actuel de la nappe (identifier zones plus sensibles au déficit)

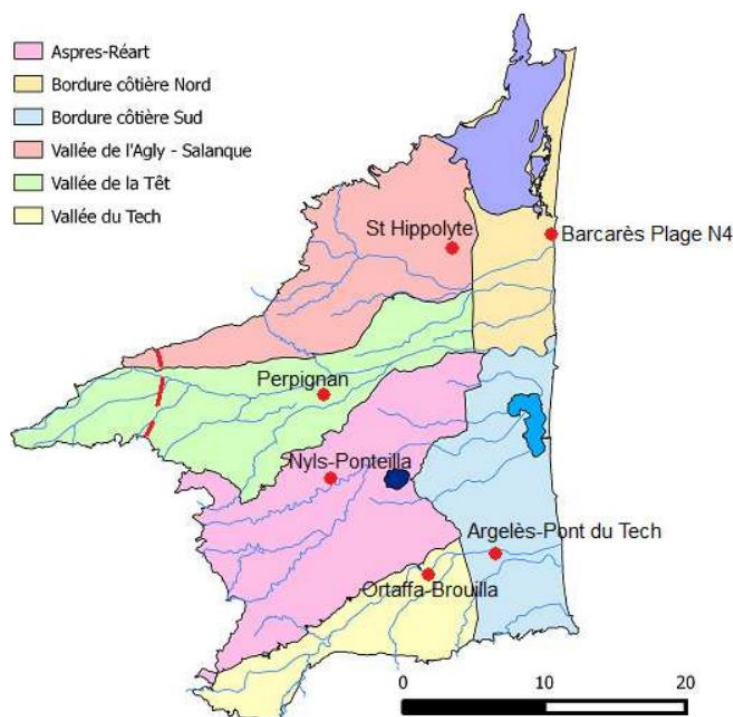
- prise en compte du **mode actuel de gestion** de la nappe. » EVP Nappe des sables Astiens

« Les **délimitations** des deux compartiments Nord et Sud réalisée à partir de **la carte géologique** » [compartimentation hydrogéologique amenant à considérer deux zones] EVP Pli Ouest de Montpellier-Karst Mosson

« Seules des **Zones de Sauvegarde Exploitées (ZSE)** ont été définies. Pour mettre en évidence ces zones un croisement entre la **vulnérabilité intrinsèque** de la nappe et les **pressions a été réalisé.** » EVP Nappes de la Giscle et de la Môle

La spatialité de l'aquifère de Lanterne et Breuchin mérite d'être évoqué car sa relation nappe rivière est particulière (Figure 12) et rappelons que ces 2 nappes n'ont qu'un seul piézomètre (3.2.2). La rivière du bas reste receveuse et celle du haut devient donneuse en étiage. Or si l'on veut fixer un DOE dans celle du haut on voit que la spatialité du pompage sera cruciale puisque le débit du breuchin dépendra directement du niveau d'abaissement de la nappe.

Figure 19 : Délimitation en secteurs de comportements piézométriques homogènes (EVP Multicouche du Roussillon)

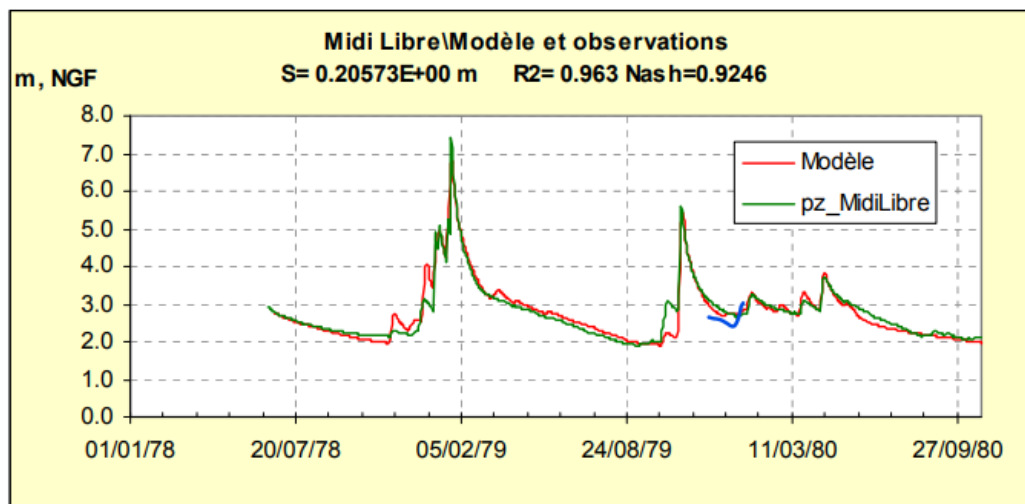


3.2.5 Synthèse de l'analyse qualitative

Les résultats de l'étude comparative qualitative démontrent la variabilité des critères qui définissent la surexploitation de la nappe et donc la détermination des seuils piézométriques et des volumes prélevables. Nous avons mis en évidence que différents critères pouvaient être pris en compte. Ces études regroupent des critères statistiques, écologiques, de salinité, de stabilité ou encore des multicritères. Le recensement des incertitudes montre que les études les prennent en compte (incertitudes physiques, de données et de modélisation). Cependant pour les modélisations, la priorité est donnée à la similitude (Figure 20) entre ce qui est calculé et ce qui est mesuré (critère de Nash). Or reproduire des données ne signifie pas que le modèle représente nécessairement le fonctionnement de

l'hydrosystème. Notons aussi que les justifications des valeurs de volumes prélevables sont entachées d'ambiguïtés, justifiant le maintien des prélèvements actuels, leur faible réduction ou alors une valeur élevée de volume prélevable. La temporalité du volume prélevable est exprimée dans 50% des cas uniquement de manière annuelle, et à 50% à l'échelle plurimensuelle ou mensuelle (rappelons que l'EVP « Alluvions de la Bresse Nappes de Bletterans et de la Vallière » n'a pas de valeur de volume prélevable). La spatialité est quant à elle séparée en 2 tendances. Dans la première, le volume prélevable concerne l'intégralité de la masse d'eau. Dans la seconde, l'étude propose des zones et y affecte un volume prélevable pour chacune d'entre elles.

Figure 20 : Exemple de test de cohérence entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées avec un critère de Nash de 0.9246 (où 1 = identique) (EVP Pli Ouest Montpellier - Karst-Mosson)



4 Interprétation

Avant d'interpréter les résultats de l'analyse quantitative, il faut préciser que les informations sur la valeur de la recharge sont soumises à une grande incertitude. Il s'avère que les études traitées indiquent parfois des valeurs imprécises ou incomplètes. Par exemple les valeurs imprécises sont issues de moyennes des valeurs estimés selon l'année (humide ou sèche) ou proviennent d'un modèle et sont donc à relativiser. De plus, dans le cas où la recharge est totalement inconnue, elle peut être considérée comme le terme de fermeture de bilan hydrogéologique et donc hériter de l'imprécision cumulée des autres termes du bilan. Enfin, bien qu'en général les précipitations étaient relativement bien connues, ils manquaient fréquemment des données concernant les apports d'eau provenant de massifs karstiques adjacents, des drainances entre aquifères et des échanges nappe-rivière. Ainsi, les valeurs de recharge présentées au travers des différents histogrammes sont à considérer avec beaucoup de précaution.

4.1 Interprétation quantitative

L'analyse quantitative met en avant des pistes de réflexion intéressantes autour des valeurs de volume prélevable.

Elle révèle dans un premier temps que pour une majorité d'exploitants, les prélèvements actuels sont considérés comme excessifs et doivent être revus à la baisse afin d'atteindre l'objectif de volume prélevable.

Dans un second temps, le volume prélevable est assimilé à une valeur très proche des prélèvements (Figure 7). Deux hypothèses peuvent être formulées quant à ce résultat : le manque de connaissances et le retour en arrière impossible. Dans le cas où la connaissance de l'aquifère reste très limitée et les

conséquences des prélèvements actuels ne semblent pas catastrophiques, ceux-ci tendent à être considérés comme acceptables et constitueraient donc un volume qu'il serait « acceptable » de prélever. La seconde hypothèse réside dans la grande difficulté à revenir en arrière une fois que des investissements lourds ont été réalisés et que les usages anthropiques se sont développés (**Horne et al., 2017**). En effet, une fois qu'une population est implantée et bien qu'il soit possible de fournir des efforts (meilleur rendement, limitation des usages industriels ou agricoles), c'est l'usage AEP qui dicte le besoin. Or l'alimentation en eau potable ne laisse que très peu de marge de manœuvre et va donc définir ce qui est « souhaitable » de prélever. Dans le cas où l'agriculture prédomine, les préleveurs ont effectué des investissements et une économie s'est développée, rendant également difficile les retours en arrière (**Molle & Closas, 2020**). En pratique, les deux facteurs peuvent être concomitants.

De plus, la Figure 6 a montré qu'une majorité de masses d'eau souterraines ont un volume prélevable souvent proche voire équivalent à la recharge. En effet, 60% des masses d'eau souterraines ont un volume prélevable supérieur ou égal à 70% du volume de la recharge, très loin de la valeur raisonnable » proposée par certains à 10%... (voir § 1.5). La situation moyenne qui semble se profiler est que la recharge est souvent considérée comme prélevable dans son intégralité ou presque. Cependant cette idée fait partie des confusions autour du volume prélevable (voir § 1.5) et est fortement discutable (**Molle, 2023**), puisque si tout l'apport d'eau net à l'hydrosystème est capté et consommé, alors les écoulements de sorties vont tendanciellement s'annuler. Si les « outflows » disparaissaient cela pourrait entraîner (selon les caractéristiques de l'aquifère) l'assèchement de sources, le drainage des rivières (et donc l'extension des assècs) ou de zones humides, et même l'arrêt d'autres pompages moins profonds. Les conséquences seraient alors environnementales, économiques et sociales

4.2 Interprétation qualitative

L'analyse qualitative fait ressortir les choix opérés dans la définition du volume prélevable, que ce soit dans les critères qui délimitent la « surexploitation », les incertitudes et les ambiguïtés plus ou moins mises à profit, ou encore à travers le choix du cadre temporel et spatial.

Les critères qui indiquent que les prélèvements actuels ou passés donnent lieu à une surexploitation sont assez bien définis dans le cas où ceux-ci sont « tangibles ». Par exemple, la détérioration de la qualité de l'eau à cause d'une intrusion saline, la perte d'écosystèmes à cause d'une déconnexion entre ces milieux et la nappe, ou l'assèchement de cours d'eau, soulignent fortement la conséquence d'une baisse piézométrique importante et donc définissent une surexploitation. Cependant, dans le cas où seules les variations issues des relevés piézométriques sont témoins du déficit, il est plus complexe de quantifier un volume prélevable ou un seuil d'alerte autrement que par les statistiques. En effet, les variations piézométriques peuvent ne pas être corrélées aux prélèvements actuels à cause de l'inertie de l'aquifère et donc donner une vision tronquée de la réalité. Malgré une forte inertie, le volume prélevable pourrait être déterminé à condition d'avoir des relevés piézométriques sur une longue période. En effet, via ces données on pourrait modéliser les variations piézométriques et ainsi déterminer, la tendance, l'inertie et le volume de recharge (donc la quantité d'eau renouvelable qui pourrait être exploitée). Dans le cas où les prélèvements seraient constants, la corrélation de l'abaissement du niveau de la nappe avec l'inertie permettrait d'obtenir une vitesse d'appauvrissement de l'aquifère. En comparant cette vitesse avec celle de la recharge, il serait possible de moduler les prélèvements (volume prélevable) pour atteindre la stabilisation piézométrique au long terme voire inverser la tendance. Notons cependant que les niveaux d'alerte et de crise seraient drastiquement moins efficaces puisque lorsqu'ils seraient atteints, l'inertie serait telle que le niveau continuerait de chuter malgré des limitations de pompages. Il faudrait alors faire des seuils de pré-alerte pour contrer cette latence.

Les critères de stabilité tendent vers une conservation des prélèvements actuels ou une limitation des réductions. Ces informations confirment les hypothèses formulées dans l'interprétation quantitative. Ainsi certaines EVP gèlent les prélèvements par manque de connaissances (EVP Nappe du Pays de Gex-Léman, ou Multicouche du Roussillon pour son VP), décident de limiter les réductions car le retour en

arrière est trop complexe (EVP Grès du Trias Inférieur), ou encore appliquent une vision erronée du « Safe Yield » donnant lieu à une valeur de volume prélevable équivalente à la recharge (EVP Molasses de Castries et Sommières). Ajoutons que les EVP Molasses de Castries et Sommières et Nappe de Dijon Sud tentent de maximiser leur volume prélevable, respectivement en prenant les incertitudes de manière arrangeante et en modulant certains prélèvements dans l'année.¹

De plus, bien que quelques incertitudes soient prises en compte pour certaines méthodes d'acquisition de données, celles-ci sont moins fréquentes concernant les modèles. Pourtant, ceux-ci sont utilisés très couramment dans les EVP. Or les modèles sont sujets à trois catégories d'erreurs : les erreurs conceptuelles, les erreurs numériques et les incertitudes (**Bredehoeft & Konikow, 2012**). Les premières sont relatives à la mauvaise compréhension de processus basiques ou à l'application du modèle sur des processus inappropriés. Les secondes sont issues des troncatures et des dispersions mathématiques. Les troisièmes quant à elles, reflètent l'incapacité à décrire les contraintes, les limites et les propriétés de l'aquifère. De plus, ce n'est pas parce que phénomène semble compris et modélisable que l'on est en mesure de le prédire (**Bredehoeft & Konikow, 2012**).

De plus, la temporalité des volumes prélevables s'exprime dans la moitié des cas de manière annuelle et pour l'autre moitié de manière mensuelle. Le danger de fixer un seuil à l'année est qu'il donne une illusion de stockage annuel or l'eau circule continuellement au sein de l'aquifère. Il est alors possible d'imaginer un scénario dans lequel les pompages en hiver seraient plus modérés tandis que les pompages en été seraient plus importants, permettant de respecter le seuil annuel mais qui occasionneraient des pompages excessifs en période d'étiage.

Enfin la spatialité est, en général, elle aussi traitée de manière globale par masse d'eau. Cependant 50% des EVP segmentent ces masses d'eau en différents secteurs et leur attribuent un volume prélevable qui leur est propre. Ce découpage peut se faire pour des raisons d'homogénéité géologique, hydrogéologique, piézométrique ou administratives. Là encore associer un volume prélevable à toute une masse d'eau révèle une vision de stockage. En effet, l'eau circulant d'un amont vers un aval, si les exploitants amont décident de pomper plus qu'habituellement, ce sont les exploitants aval qui en pâtiront et qui seront contraints de respecter le seuil global de prélèvement. Ceci s'applique également aux nappes, si l'on considère une version élargie de l'amont et de l'aval, selon le sens des écoulements.

5 Conclusion

Cette analyse des EVP sur les eaux souterraines du bassin RMC aura permis de mettre en lumière la notion de volume prélevable employée au sein de ces études. D'une part l'analyse quantitative a démontré que le volume prélevable était en général proche des prélèvements actuels et qu'il valait la totalité ou presque de la recharge. Ce constat semble pouvoir être expliqué par des intérêts politiques s'appuyant sur une conception incorrecte du « Safe Yield », un manque de connaissances mis à profit, et une impossibilité de faire marche arrière. Les résultats de l'analyse qualitative ont permis d'apporter de nouveaux éléments complémentaires à ces hypothèses. Les critères qui délimitent les seuils de surexploitation sont liés à des facteurs limitants « tangibles », lorsque cela se peut, et qui sont induits par la baisse des flux sortants comme les intrusions salines, les déconnexions des milieux humides ou l'assèchement de cours d'eau. Cependant, les cas où aucune catastrophe ne s'est produite sont confrontés au manque de critères tangibles, c'est alors le critère statistique qui domine. Bien que ces critères semblent tenir compte des « outflows » et donc porter une vision cohérente du « Safe Yield », les critères de stabilité contredisent cette vision et amènent les volumes prélevables à prendre des valeurs proches des prélèvements actuels ou équivalentes à la recharge. Ajoutons que les incertitudes sont en général identifiées mais peu quantifiées. D'une part, le recul critique sur les résultats produits

¹ Pour les molasses de Castries on est passé de 0.7 Mm³ à 1,6 Mm³ pour finir à 2 Mm³ via de hauts intervalles et des incertitudes considérées de manière arrangeante. A Dijon la nappe est « sous-exploitée » et on est passé de 6 Mm³/an, censé être le maximum au vu du DMB, à 7 Mm³, en déplaçant les prélèvements agricoles dans l'année.

par les modèles est insuffisant. D'autre part, certaines citations témoignent de la volonté de prendre la valeur de volume prélevable la plus haute possible grâce au spectre des incertitudes. La temporalité et la spatialité sont plus ou moins prise en compte. En effet, 50% des études définit un volume prélevable pour une masse d'eau, et ce, à l'année. Or cet encadrement temporel et spatial néglige l'aspect mobile de l'eau et donc conduit malgré tout à des situations de surexploitation.

Enfin, les volumes prélevables sont représenté par des valeurs fluctuantes et empreintes de choix politiques. Or celles-ci seront sans doute amenées à changer que soit par un changement de vision, sur ce qui est « acceptable » de prélever qu'il s'agisse des réalisateurs d'EVP mais aussi des autres parties prenantes ; ou que ce soit par le changement climatique, affectant à la fois les paramètres d'entrées et de sorties des socio-hydrosystèmes.

6 Bibliographie

Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse, Délégation de bassin Rhône Méditerranée, DREAL du bassin Rhône Méditerranée, Onema. (2010). *Etudes de détermination des volumes maximums prélevables - Cahier des charges « type »*.

https://www.creseb.fr/voy_content/uploads/2011/10/CCTPType_VolumesPrelevables_AERMC_2010.pdf

Alexandra, J.; Rickards, L. and Pahl-Wostl, C. 2023. The logics and politics of environmental flows - A review. *Water Alternatives* 16(2): 346-373. <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol16/v16issue2/704-a16-2-7/file>

Avril C. Horne, Erin L. O'Donnell, Rebecca E. Tharme, Chapter 17 (2017) - Mechanisms to Allocate Environmental Water, Editor(s): Avril C. Horne, J. Angus Webb, Michael J. Stewardson, Brian Richter, Mike Acreman, *Water for the Environment*, Academic Press, Pages 361-398, ISBN 9780128039076, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00017-6>.

Barrazza J.J., Molle François. (2022). Les Etudes de Volumes Prélevables (EVP) : bilan pour la région Occitanie (Bassin RMC). [Rapport de recherche] IRD. 30 p. (hal-04130717)

Bassin Rhône Méditerranée (13 mai 2024). *Plan de Gestion de la Ressource en Eau (PGRE)*. Bassin Rhône Méditerranée. <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sobriete-des-usages-et-partage-de-la-ressource/plans-de-gestion-de-la-ressource-en-eau-pgre>

Bassin Rhône Méditerranée (17 avril 2024). *Etudes d'évaluation des volumes prélevables sur les eaux souterraines*. (« Grès du Trias inférieur », « Lanterne Breuchin », « Nappe de Dijon sud », « Alluvions de la Bresse - Nappes Bletterans et Vallière », « Nappe profonde du Genevois », « Nappe du pays de Gex - Léman », « Couloirs de l'Est lyonnais », « Alluvions du Rhône - Péage de Roussillon », « Nappes de la Giscle et de la Môle », « Nappe des sables Astiens », « Pli Ouest de Montpellier - Karst Mosson », « Multicouche du Roussillon », « Molasses de Castries et Sommières »). Bassin Rhône Méditerranée. <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sobriete-des-usages-et-partage-de-la-ressourceprelevements-en-eauetudes-des-volumes-prelevables>

Bassin Rhône Méditerranée (23 janvier 2024). *Alluvions du Gapeau*. Bassin Rhône Méditerranée. <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/eau-potable-et-assainissement/eau-potable/ressources-strategiques/alluvions-du-gapeau> et https://doc-oai.eaurmc.fr/cindocoai/download/5283/3/FL34.D.0038%20Rapport%20GAPEAU%20phase%20-%20etape%203%20v2.pdf_10990Ko

Bassin Rhône Méditerranée (3 janvier 2019). *L'Argens*. Bassin Rhône Méditerranée. <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/l-argens>

Bredehoeft, J. D., & Konikow, L. F. (2012). Ground-Water Models : Validate or Invalidate. *Groundwater*, 50(4), 493-495. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00951.x>

Bureau du comité du bassin Rhône-Méditerranée. (2011). *Méthodes des études volumes prélevables*. Comité de bassin Rhône-Méditerranée. <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sobriete-des-usages-et-partage-de-la-ressourceprelevements-en-eau/etudes-devaluation-des-volumes>

Conseil scientifique du comité du bassin Rhône-Méditerranée. (2011). *Avis sur les méthodes utilisées dans les études « volumes prélevables »*. Comité de bassin Rhône-Méditerranée. <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sobriete-des-usages-et-partage-de-la-ressourceprelevements-en-eau/etudes-devaluation-des-volumes>

Capon, S. J., & Capon, T. R. (2017). An impossible prescription: Why science cannot determine environmental water requirements for a healthy Murray-Darling Basin. *Water Economics and Policy*, 3(03), 1650037. <https://doi.org/10.1142/S2382624X16500375>

Horne, A. C., O'Donnell, E. L., Acreman, M., McClain, M. E., Poff, N. L., Webb, J. A., ... & Hart, B. T. (2017). Moving forward: The implementation challenge for environmental water management. In *Water for the environment* (pp. 649-673). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00027-9>

Kalf, F.R.P., Woolley, D.R. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. *Hydrogeol J* 13, 295–312 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0401-x>

- Maréchal, J.C., Rouillard, J. (2020). Groundwater in France: Resources, Use and Management Issues. In: Rinaudo, J.D., Holley, C., Barnett, S., Montginoul, M. (eds) *Sustainable Groundwater Management*. Global Issues in Water Policy, vol 24. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_2
- Meyland, S. J. (2011). Examining safe yield and sustainable yield for groundwater supplies and moving to managed yield as water resource limits become a reality. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 145, 813-823. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/145/22143>
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. (2022). *Appui à l'aboutissement de projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE)*. <https://agriculture.gouv.fr/appui-laboutissement-de-projets-de-territoire-pour-la-gestion-de-leau-ptge>
- [Ministère de la culture \(mis à jour en 2024\). Les unités mixtes de recherche.](https://www.culture.gouv.fr/Thematiques/archeologie/Acteurs-formations/Les-unites-mixtes-de-recherche) <https://www.culture.gouv.fr/Thematiques/archeologie/Acteurs-formations/Les-unites-mixtes-de-recherche>
- Molle, F. (2023). Aquifer Recharge and Overexploitation : The Need for A New Storyline. *Groundwater*, 61. <https://doi.org/10.1111/gwat.13299>
- Molle, F., & Closas, A. (2020). Why is state-centered groundwater governance largely ineffective? A review. *WIREs Water*, 7(1), e1395. <https://doi.org/10.1002/wat2.1395>
- Molle, F., & Collard, A. L. (2024). Sharing Water Between Nature and Humans: Environmental Flows and the Politics of Quantification. *Water Alternatives*, 17(2), 510-532. <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol17/v17issue2/756-a17-2-14/file>
- Office internationale de l'eau (2009). *Organisation de la gestion de l'eau en France*. <https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/documents/pdf/OIEau - Gestion de l'eau en France.pdf>
- Ponce, V. M. (2007). Sustainable yield of groundwater. *California Department of Water Resources*. https://ton.sdsu.edu/gra_0809251330.html
- Richter, B., & Orr, S. (2017). Water Budgets to Inform Sustainable Water Management. In *Water for the Environment* (pp. 347-360). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00016-4>
- Stewardson, M. J., Acreman, M., Costelloe, J. F., Fletcher, T. D., Fowler, K. J., Horne, A. C., ... & Peel, M. C. (2017). Understanding hydrological alteration. In *Water for the Environment* (pp. 37-64). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00003-6>
- Vaute L., Gigleux S., Nguyen-Thé D. (2007) – Eaux souterraines du département des Vosges : caractérisation des principales ressources exploitables et révision du modèle de gestion de la nappe des grès du Trias inférieur. Rapport BRGM/RP-55653-FR, 145 p., 62 fig., 9 tabl., 3 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55653-FR.pdf>

7 Annexe

Annexe 1 : Tableau non exhaustif des différentes définitions attribuées à la notion de « Safe Yield » (Kalf & Wolley, 2005)

Table 1 Author, yield concepts, definition and comments

Author	Concepts and definition	Comments
Lee (1915)	Safe yield: <i>“The limit to the quantity of water which can be withdrawn regularly and permanently without dangerous depletion of the storage reserve.”</i>	Hydrologically based on something less than dangerous storage depletion. What does dangerous and regular mean? Yield available in perpetuity (i.e. sustainable)
Meinzer (1920)	Safe yield: <i>“ ..the practicable rate of withdrawing water from it (the aquifer) primarily for human use.”</i>	Hydrologically based and a yield available in perpetuity (i.e. sustainable). <i>“Sensible, but overdraft not evident until after it has occurred”</i> (Kazmann 1988)
Meinzer (1923)	Safe yield: <i>“The rate at which water can be withdrawn from an aquifer for human use without depleting the supply to the extent that withdrawal at this rate is no longer economically feasible.”</i>	Hydrologically based but dependent on the pumping economics
Theis (1940)	Perennial safe yield: [for non-artesian aquifers that are small and most artesian aquifers] <i>“there is a perennial safe yield equivalent to the amount of rejected recharge [induced recharge] and natural discharge it is feasible to utilize.”</i>	Implies concept may not apply to large aquifer with low diffusivity (T/S) ^a and isolated abstraction
Stuart (1945)	Safe yield: <i>“is the maximum rate at which water may be withdrawn without impairing the quantity and quality of the supply.”</i>	Hydrologically based on the Meinzer concept with water quality constraint added
Conkling (1946)	Safe yield: <i>“ Taken over 1 year should not: (1) Exceed average annual recharge; (2) Lower water table so that the permissible cost of pumping is exceeded;(3) Lower water table so as to permit intrusion of undesirable quality.”</i>	Hydrologically based on natural recharge but production facility economics included in definition plus water quality constraint
Williams and Lohman (1949)	Perennial yield: <i>“has been regarded as the maximum rate at which water can be salvaged from the natural discharge, or added to the (natural) recharge or both... In some reports economical pumping lift has been a factor in this definition; however, the economics of recovery seem to be irrelevant to the determination of the quantity of water which an aquifer will yield and so are not considered here.”</i>	Return to a hydrologically based definition. However, no consideration of storage capacity
Thomas (1951, 1955)	Safe yield: suggests abandoning the term because of its indefiniteness	US Geological Survey calls for abandonment of Safe Yield terminology about this time
Synder (1955)	Overdraft/overdevelopment: 5 types (1) Development overdraft-lowering of water table in areas of natural recharge/discharge; (2, 3) Season or cyclic overdraft: zero net change in water levels over specific time period year to year; Cyclic, water levels over two or more seasons and then return; (4) Long-run overdraft: perennial pumping exceeding replenishment (i.e. mining); (5) Critical overdraft-pumping leads to irreversible undesirable result	Definition of overdraft or overdevelopment in areas exceeding sustained (sic) yield (Domenico 1972). All overdraft yields are unsustainable
Kazmann (1956)	Safe yield: – suggests abandoning the term because of its indefiniteness	
Todd (1959)	Safe yield: <i>“ the amount of water which can withdrawn from (a groundwater basin) annually without producing an undesirable result.”</i>	<i>“Compact, but adds nothing to clarify the situation in that the ‘undesirable results’ include concern for available water, economics of pumping, quality and water rights.”</i> (Domenico 1972)
ASCE (1961) ^b	Four concepts of safe yield; (1) <i>Maximum sustained (sic) yield— maximum perennial abstraction;</i> (2) <i>Permissive sustained yield— maximum perennial abstraction legally and economically for beneficial use without undesirable result;</i> (3) <i>Maximum mining yield —total volume in storage that can be extracted and utilized;</i> (4) <i>Permissive mining yield—maximum volume in storage that can be extracted for beneficial purposes without undesired result.</i>	Designed to remove ambiguity of safe yield concept. Definition is a mix between basin mass balance (water budget) and production facility response
Freeze (1971); Freeze and Cherry 1979	Demonstrates relationship between basin water balances using 3D variably saturated model. Simulation defines the <i>“Maximum stable basin yield.”</i>	Illustrated variation of inflows and outflows and storage depletion over time
ASCE (1972)	Two types: (1) <i>Maximum mining yield—abstraction exceeds annual replenishment,</i> (2) <i>Perennial yield—rate at which water can be salvaged from the natural discharge, or added to the [natural] recharge or both.</i>	(1) Exceeds natural plus induced recharge -unique value (2) based on changing values depending on groundwater levels in basin
Domenico (1972)	<i>“The question whether groundwater should be managed on a sustained or mining-yield basis is not yet fully resolved and is controlled by local conditions and demands than by policy decisions in advance of their absolute necessity. This is understandable in that there is likely to be little public sympathy for an announced depletion policy, whereas one of sustained use lends a ring of permanency. Whatever the merits of sustained and mining yield concepts, they are definitely ingrained in groundwater management.”</i>	Page 80

Table 1 (continued)

Author	Concepts and definition	Comments
Bouwer (1978)	Safe yield: Three types. (1) (<i>Normal</i>) Safe yield—is equal to the average replenishment rate of the aquifer.-limited by intrusion near coast; (2) Economic safe yield—rate at which groundwater can be withdrawn without danger of wells drying up before adequate tax base for more expensive water is established (i.e. mining); (3) Legal safe yield—“rate at which a well owner can pump groundwater without getting involved in legal action.”	Mixes hydrological based recharge, production facility maximum available drawdown and non-hydrological legal issues
Bredehoeft et al. (1982, 1997, 2002)	Sustainable groundwater development is determined by capture of natural discharge. Basing groundwater development sustainability on natural recharge (i.e. safe yield) is a myth and irrelevant	Focus is on production facility transient phase leading up to equilibrium. Implies sustainability means groundwater system must reach equilibrium. Numerical modelling required to determine response
Brudtland (1987)	Sustainable development to take into account environmental and social issues and long-term protection of resource	Not specifically related to groundwater but the origin of sustainability concept
Sophocleous (1997, 1998, 2000)	Sustainable yield primarily derived from groundwater storage but ultimately from induced recharge (i.e. surface water depletion). Sustainable yield must allow for sustainability of environment and therefore should be less than safe yield	States that numerical models are best to determine and distinguish between natural and induced recharge. Indicates “irrelevance” of natural recharge ^c
Alley and Leake (2004)	Review differences between safe yield and sustainability	No definition or methodology given but indicate ambiguities and complexities of concepts and usefulness of numerical models in determination

^a Diffusivity T/S: Transmissivity divided by storativity

^b American Society of Civil Engineers

^c Bredehoeft (2002) and Kendy (2003) have also stated that natural recharge is irrelevant

Annexe 2 : Comparaison des efforts à réaliser pour atteindre le volume prélevable et de la part d'AEP dans les usages

