



Estimation des volumes prélevables dans les aquifères à nappe libre : retour d'expériences sur les méthodes utilisées, identification des problèmes rencontrés, recommandations

Rapport final

BRGM/RP-64615-FR
Mars 2016

Estimation des volumes prélevables dans les aquifères à nappe libre : retour d'expériences sur les méthodes utilisées, identification des problèmes rencontrés, recommandations

BRGM/RP-64615-FR
Mars 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

L. Arnaud

Vérificateur :

Nom : J.-J. Seguin

Date : 16/04/2016

Signature :



Approbateur :

Nom : Y. Barthélemy

Date : 22/06/2016

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

RÉSUMÉ

Suite à la publication de plusieurs études d'estimation des volumes prélevables ces dernières années et face aux difficultés rencontrées pour tenir compte à la fois des eaux de surface et des eaux souterraines, l'ONEMA a demandé au BRGM d'établir un premier retour d'expérience sur la détermination des volumes prélevables pour les aquifères à nappe libre.

Pour ce faire, un panel de plus de trente études a été compilé par le BRGM. Même si les contextes de nappes alluviales sont les plus représentés, la variété des milieux aquifères et des relations eaux souterraines / eaux superficielles a été prise en compte dans la sélection.

Les approches développées apparaissent, tout d'abord, très hétérogènes, aussi bien du point de vue méthodologique que de celui des outils utilisés. Quelle que soit la méthode mise en œuvre, les incertitudes liées à l'estimation des volumes prélevables sont nombreuses. En premier lieu, une bonne connaissance de la dynamique des hydrosystèmes et des prélèvements devrait être un prérequis, rarement satisfait. En outre, les méthodes de calcul ainsi que les outils de modélisation qui visent à conceptualiser une réalité complexe présentent des limites intrinsèques.

Il s'avère donc qu'une méthodologie unique, aussi pertinente soit-elle, ne suffit pas à couvrir la variété des contextes hydrogéologiques et se heurte au problème récurrent des données insuffisantes pour obtenir des estimations fiables.

Au regard de la forte hétérogénéité des approches, il a été décidé de proposer un « catalogue » descriptif de différents cas d'étude (regroupés par type d'outil : sans mise en œuvre d'un modèle, modélisations globales et modélisations spatialisées) dans l'objectif de proposer aux acteurs en charge des études de volumes prélevables un choix de méthodologies susceptibles d'être réutilisées et/ou adaptées.

En termes de résultats, de nombreuses études (14) aboutissent à la proposition de scénarios de réduction des prélèvements. Des efforts de réduction importants sont parfois attendus avec, par exemple, des unités de gestion concernées par des baisses de prélèvement de 40 % et plus pendant la période d'étiage.

Peu d'études (4) prennent en compte les impacts du changement climatique dans l'évaluation des volumes prélevables à plus long terme.

Des orientations méthodologiques sont enfin proposées par le BRGM, tout en veillant à ne pas imposer une méthodologie unique. Il est, par contre, important qu'une démarche structurante, commune aux différentes études, soit suivie. Les principales étapes d'une telle démarche sont les suivantes : 1) constitution d'un Comité de Pilotage, 2) caractérisation hydrogéologique de l'hydrosystème, 3) inventaire exhaustif des prélèvements et rejets, 4) définition des objectifs environnementaux, 5) choix de la (des) méthodologie(s) et des outils, 6) délimitation des unités de gestion, 7) détermination des indicateurs de gestion associés aux objectifs environnementaux, 8) estimation des volumes prélevables et confrontation aux situations passées, à la recharge le cas échéant, et 9) perspectives d'amélioration et programme d'acquisitions complémentaires si nécessaire.

Pour chacune de ces étapes, des points méthodologiques, accompagnés de renvois vers des guides techniques, sont présentés. Concernant la synthèse hydrogéologique de la zone d'étude, des focus sont par exemple faits sur l'élaboration du schéma conceptuel hydrogéologique, la caractérisation des échanges nappe-rivière, le bilan hydrologique et le calcul de la recharge, ainsi que sur l'intrusion saline au sein des aquifères côtiers.

Enfin, au regard des nombreuses incertitudes mises en exergue au cours de l'étude, l'estimation des volumes prélevables ne devrait pas rester figée dans le temps ; une actualisation est indispensable en lien avec l'allongement des séries de données hydro-climatiques, la mise à jour des modèles, l'amélioration des connaissances, etc. Dans le même ordre d'idée, il est primordial qu'un programme d'acquisition de données complémentaires - dont l'absence pèse sur les volumes prélevables annoncés - soit recommandé dans les conclusions de l'étude.

Mots clés : DCE, Débit de base, Eaux souterraines, Eaux superficielles, Hydrogéologie, Indicateurs piézométriques, Modèle global, Modèle hydrodynamique, Recharge, Zone de Répartition des Eaux, Volumes Prélevables.

Couverture géographique :

Niveau de lecture :

CORRESPONDANTS ONEMA : AUGÉARD Bénédicte

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Arnaud L. (2016) - Estimation des volumes prélevables dans les aquifères à nappe libre : retour d'expériences sur les méthodes utilisées, identification des problèmes rencontrés, recommandations. Rapport final, BRGM/RP-64615-FR. 107 pages, 42 ill., 1 annexe.

Synthèse pour l'action opérationnelle

Cadre de l'étude :

La circulaire du 30 Juin 2008, relative à *"la résorption des déficits quantitatifs en matière de prélèvement d'eau et gestion collective des prélèvements d'irrigation"* propose de distinguer deux aspects de la gestion quantitative de la ressource en eau : d'une part, une gestion structurelle, pluriannuelle, qui permet de garantir le bon état d'une masse d'eau souterraine au titre de la DCE, tous usages confondus, et d'autre part, une gestion de crise (ou conjoncturelle), liée à des épisodes climatiques exceptionnels. Pour atteindre ces deux objectifs, elle introduit une notion fréquentielle fixant une borne au volume prélevable qui doit être tel qu'il permette de garantir statistiquement 8 années sur 10 le bon fonctionnement des milieux aquatiques correspondants.

Les volumes prélevables sont ainsi indissociables de considérations temporelles et spatiales (localisation des prélèvements). Si l'on ajoute à ces dernières l'hétérogénéité et la complexité des systèmes aquifères rencontrés, on comprend que le concept de volume prélevable soit un sujet particulièrement compliqué.

Suite à la publication de plusieurs études ces dernières années et aux difficultés d'évaluation des volumes prélevables rencontrées, l'ONEMA a demandé au BRGM d'établir un premier retour d'expérience sur la détermination des volumes prélevables pour les aquifères à nappe libre.

Démarche suivie par le BRGM :

Un panel de plus de trente études a été compilé par le BRGM. Même si les contextes de nappes alluviales sont les plus représentés, la variété des milieux aquifères et des relations eaux souterraines / eaux superficielles a été prise en compte dans la sélection.

La première phase avait pour objectif de compiler un panel d'études réalisées en examinant plus particulièrement les démarches et méthodes mises en œuvre, les difficultés rencontrées, ainsi que les principales incertitudes associées aux estimations.

Dans un deuxième temps, le BRGM s'est attaché à proposer des orientations méthodologiques visant à aider les gestionnaires en charge de la question des volumes prélevables (suivi d'études futures, révision / actualisation d'études passées).

Études consultées et méthodologies d'évaluation mises en œuvre :

Un tableau récapitulatif des études consultées est présenté en Annexe 1 ; plusieurs éléments d'information y sont rapportés : site d'étude, bassin hydrographique, année de réalisation, maître d'œuvre, méthode appliquée, outils utilisés, critères d'objectif, renvoi vers le(s) paragraphe(s) du rapport concerné(s).

À quelques exceptions près, il s'agit d'études récentes, postérieures à 2011. La majorité des études consultées concerne le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (premier territoire à avoir lancé à grande échelle des études de volumes prélevables).

Les études recueillies ont été conduites par de nombreux maîtres d'œuvre (14).

Les approches développées apparaissent, tout d'abord, très hétérogènes, aussi bien du point de vue méthodologique que de celui des outils utilisés. Face à ce constat, il a été décidé de proposer un « catalogue » descriptif de différents cas d'étude pour lesquels la méthodologie élaborée a été jugée intéressante.

D'un point de vue opérationnel, l'objectif est ici de proposer aux acteurs chargés d'études de volumes prélevables un choix de méthodologies susceptibles d'être réutilisées et/ou adaptées. De nombreux cas d'étude sont ainsi brièvement présentés au chapitre 3 de ce rapport. Ils ont été regroupés par type d'approche : sans mise en œuvre d'un modèle, modélisations globales et modélisation spatialisées.

Difficultés rencontrées, limites et incertitudes :

Quelle que soit la méthode mise en œuvre, les incertitudes liées à l'estimation des volumes prélevables impliquant des prélèvements en nappe libre sont nombreuses. En premier lieu, une bonne connaissance de la dynamique des hydrosystèmes et des prélèvements devrait être un prérequis, rarement satisfait. En outre, les méthodes de calcul ainsi que les outils de modélisation qui visent à conceptualiser une réalité complexe présentent des limites intrinsèques.

Ainsi, les principales limites et incertitudes mises en évidence concernent :

- la méconnaissance des prélèvements et rejets, en particulier pour ce qui concerne les usages agricoles et domestiques. Leur évaluation nécessite de nombreuses approximations et extrapolations (aux périodes anciennes, à un pas de temps mensuel, voire journalier, etc.) et se trouve par conséquent entachée d'une forte incertitude. Or, l'évaluation des volumes prélevés va directement impacter l'évaluation des volumes prélevables, quelle que soit la méthode mise en œuvre ;
- la non-disponibilité de chroniques de suivi des débits et/ou des niveaux piézométriques de longue durée. Cela constitue un frein à l'évaluation des volumes prélevables, et ce quelle que soit l'approche suivie (avec ou sans modélisation). Pour les modèles numériques, il est, par exemple, important que l'opération de calage soit conduite sur des durées suffisamment longues afin de couvrir des conditions climatiques variées et plusieurs cycles hydrologiques. Ce point est particulièrement critique lorsqu'on s'intéresse aux étiages ou à des nappes de forte inertie ;
- l'incertitude significative sur les mesures de débit des rivières, particulièrement en période d'étiage. Celle-ci se répercute directement sur l'évaluation des débits objectifs d'étiage, souvent utilisés pour estimer les volumes prélevables ;
- l'incertitude associée à la détermination du débit biologique (DB), également retenu comme débit à maintenir dans le cours d'eau pour de nombreuses études. Au-delà de la mesure de terrain elle-même, il faut noter que les stations au droit desquelles sont évalués les DB ne correspondent pas forcément aux stations de jaugeage. Il est alors nécessaire d'extrapoler le DB plus en amont ou plus en aval avec des conditions hydrologiques et des pressions pouvant différer ;
- la non-homogénéité des débits d'objectif retenus pour les différentes unités de gestion d'un même bassin versant : débits issus du SDAGE, d'arrêtés sécheresse, débits biologiques ou calculés à partir de débits statistiques (QMNA5, etc.). Pour les cas d'étude concernés, les volumes prélevables sont ainsi évalués sur des bases différentes, plus ou moins restrictives. Dans la majorité des cas, cela résulte de

l'impossibilité de travailler à partir des débits biologiques préalablement définis (cours d'eau aux étiages marqués où le débit biologique est régulièrement dépassé) ;

- les limites associées aux modèles maillés, limites intrinsèques à l'outil ou introduites par méconnaissance du fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème étudié ;
- les limites intrinsèques aux modèles globaux. Du point de vue de l'estimation des volumes prélevables, la principale limite est ici liée au fait que la répartition géographique des prélèvements ne soit pas prise en compte, car les prélèvements sont globalisés. Ainsi, lorsque la répartition des captages n'est pas homogène sur le bassin modélisé, les résultats issus des modèles peuvent être entachés d'erreurs. La prise en compte des prélèvements en nappe est, par ailleurs, délicate pour une modélisation globale pluie-débit ;
- enfin, les volumes prélevables calculés ne permettent pas toujours une gestion quantitative fine de la ressource en eau : volumes annuels et non ciblés sur la période d'étiage, volumes regroupant indistinctement eaux superficielles et eaux souterraines, notion fréquentielle (respect des objectifs environnementaux 8 années sur 10) non considérée.

Il est, par conséquent, essentiel de garder à l'esprit que les volumes prélevables sont calculés au moyen d'approximations et d'hypothèses simplificatrices. Ils doivent de ce fait être considérés comme des ordres de grandeur, des valeurs guides à actualiser avec l'amélioration des connaissances et l'allongement des chroniques de mesure.

En conclusion de ce tour d'horizon, il s'avère qu'une méthodologie unique, aussi pertinente soit-elle, ne suffit pas à couvrir la variété des contextes hydrogéologiques et se heurte au problème récurrent de données insuffisantes pour obtenir des estimations fiables. Ces deux aspects, diversité des contextes d'une part, rareté des données d'autre part, contraignent à proposer des solutions alternatives, parfois peu satisfaisantes.

Résultats en termes de scénarios d'exploitation

Il faut souligner que des efforts de réduction des prélèvements importants sont attendus sur de nombreux territoires ; plusieurs unités de gestion sont, en effet, assujetties à des baisses de prélèvement de 40% et plus pendant la période d'étiage.

Peu d'études prennent en compte les impacts du changement climatique dans l'évaluation des volumes prélevables à plus long terme. Seules quatre études s'y intéressent, toutes réalisées sur le bassin RMC. Une baisse des précipitations estivales est appliquée sur la base des études de quantification de l'impact du changement climatique réalisées par l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique). La réduction des volumes prélevables à l'horizon 2050, liée à l'impact du changement climatique, varie de 5 à 10 % selon les bassins versants étudiés.

Enfin, peu d'études s'attachent à tester des scénarios de prélèvement exploratoires, c'est-à-dire dans une configuration différente : variantes de la distribution spatiale et de la ventilation temporelle des pompages, transfert d'un aquifère à l'autre, report des prélèvements en eau superficielle sur les eaux souterraines. Cette analyse, possible avec les modèles maillés, peut pourtant s'avérer très utile pour optimiser la gestion de la ressource en eau et préparer la phase de concertation entre les usagers.

Orientations méthodologiques :

Au regard de la complexité de l'estimation des volumes prélevables et des spécificités de chacun des sites d'étude, il est capital qu'une démarche structurante, commune aux différentes études, soit suivie. En revanche, il n'est pas souhaitable d'imposer une méthodologie de travail unique, car celle-ci doit être adaptée au contexte hydrogéologique et aux données disponibles.

Les principales étapes de la démarche rationnelle à appliquer sont les suivantes :

- 1) Constitution d'un Comité de Pilotage en amont de l'étude, dans le but de valider les décisions prises en cours d'étude qui pourraient s'écarter des recommandations formulées pour estimer les volumes prélevables. Dans la mesure du possible, le Comité de Pilotage doit réunir tout ou partie des acteurs suivants : Agence de l'Eau, DREAL, Service de Police de l'Eau, Conseil Général, Conseil Régional, ONEMA, Chambre départementale d'Agriculture, Chambre de commerce et d'industrie, Structures de gestion (SAGE, OUGC, ...), Représentants des usagers (syndicats AEP, industriels, etc...);
- 2) Caractérisation hydrogéologique de l'hydrosystème. Elle doit permettre d'aboutir à l'élaboration du modèle conceptuel hydrogéologique : extensions horizontale et verticale du système aquifère, succession des couches géologiques (lithologies et caractéristiques hydrodynamiques), conditions hydrauliques aux limites, nature des relations nappe-rivière et différents flux d'entrée et de sortie (recharge, prélèvements, échanges entre aquifères, etc.). Dans le cas des aquifères à nappe libre, une attention particulière devra être portée à la caractérisation des échanges nappe-rivière et à l'évaluation de la recharge. Pour ce faire, plusieurs guides méthodologiques sont répertoriés par le BRGM. En ce qui concerne la problématique de l'intrusion saline dans les aquifères côtiers, il est recommandé de mettre en place une acquisition régulière de logs de conductivité en forage (mesures échelonnées sur la verticale de la colonne d'eau).
- 3) Inventaire le plus exhaustif possible des prélèvements et rejets. Au-delà des informations fournies par les Agences de l'Eau, les DDT, les Services de navigation, les DREAL et les DDPP, il est demandé de conduire plusieurs investigations spécifiques visant à atteindre l'exhaustivité : analyse des besoins en eau en fonction des cultures, enquêtes et visites de terrain, etc. La collecte des données doit être organisée au pas de temps mensuel et doit être capitalisée par l'alimentation de la Banque Nationale sur les Prélèvements en Eau (BNPE) (constitution d'une base de données au format Sandre) ;
- 4) Définition des objectifs environnementaux en concertation avec le Comité de Pilotage. Ils peuvent être de différentes natures en fonction des contextes : maintenir un écoulement minimal dans les cours d'eau connectés à la nappe, limiter l'intrusion saline, ne pas inverser les flux de nappe à proximité d'une zone humide, respecter un équilibre sur le long terme entre les volumes s'écoulant au profit des autres milieux ou d'autres nappes, les volumes captés et la recharge de l'aquifère. Différents types d'objectif peuvent coexister ;
- 5) Choix de la (des) méthodologie(s) et des outils. *A minima*, il est préconisé de procéder à une analyse de l'historique des données (pluie, ETP, débits, niveaux piézométriques, volumes prélevés, conductivité électrique de l'eau). Pour les hydrosystèmes connaissant ou ayant connu une exploitation intensive, il est, en effet, possible de proposer de manière pragmatique une borne supérieure aux volumes prélevables par une simple analyse croisée des données historiques. Si les données disponibles le permettent, le

recours à des outils de modélisation peut, dans un second temps, être envisagé. Un arbre de décision est proposé pour aider le gestionnaire à choisir entre modèle maillé et modèle global. Enfin, de nombreuses préconisations techniques relatives à l'utilisation des modèles maillés et globaux sont listées en lien avec la question des volumes prélevables ;

- 6) Délimitation des unités de gestion sur la base de critères hydrologiques et hydrologiques. Le recours aux limites administratives est à proscrire ;
- 7) Détermination des indicateurs de gestion associés aux objectifs environnementaux. Le plus souvent, les contraintes environnementales sont directement traduites par le respect de débits ou niveaux piézométriques d'objectif. D'autres critères d'objectif peuvent cependant s'avérer pertinents : impact des prélèvements sur le QMNA5 naturel, fréquence et étendue des assecs, valeur seuil de conductivité. Dans le cas d'indicateurs déjà existants (issus des SDAGE, SAGE), une analyse critique doit être conduite afin de vérifier leur adéquation avec une étude d'estimation des volumes prélevables (objectifs poursuivis lors de leur détermination, méthodes de calcul, etc.).
- 8) Estimation des volumes prélevables. Il est impératif que les études aboutissent à la détermination d'un volume prélevable mensuel ou, *a minima*, un volume cumulé sur la période de tension (étiage, période d'irrigation). Les résultats doivent être présentés en regard des principales limites identifiées (limites de connaissance et hypothèses pour y remédier, limites d'ordre méthodologique). Il serait alors intéressant de conclure quant à leur implication sur le résultat : l'estimation des volumes prélevables est-elle optimiste ou pessimiste ?
- 9) Perspectives d'amélioration. L'estimation des volumes prélevables ne doit pas rester figée dans le temps ; une actualisation est indispensable en lien avec l'allongement des séries de données hydro-climatiques, la mise à jour des modèles, l'amélioration des connaissances, etc. Le cas échéant, il est primordial qu'un programme d'acquisition de données complémentaires - dont l'absence pèse sur les volumes prélevables annoncés - soit proposé dans les conclusions de l'étude.

Sommaire

1. Cadre de l'étude	15
1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....	15
1.1.1. Circulaire du 30 juin 2008	15
1.1.2. Définition du bon état quantitatif d'une masse d'eau souterraine au titre de la DCE15	
1.2. CADRE MÉTHODOLOGIQUE EXISTANT.....	16
1.3. OBJECTIFS ET PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE	18
2. Études consultées et difficultés rencontrées	19
2.1. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES ÉTUDES.....	19
2.2. DÉMARCHES GÉNÉRALES	21
2.2.1. Eaux superficielles et eaux souterraines non différenciées	21
2.2.2. Eaux souterraines différenciées	22
2.3. PRINCIPALES DIFFICULTÉS MENTIONNÉES DANS LES ÉTUDES.....	24
2.3.1. Disponibilité des données	24
2.3.2. Limites associées aux modèles maillés utilisées dans l'évaluation.....	28
2.3.3. Limites associées aux modèles globaux	31
2.3.4. Limites associées aux volumes prélevables estimés.....	34
2.4. CONCLUSIONS.....	35
3. Présentation de cas d'étude et de résultats	37
3.1. SANS MISE EN ŒUVRE D'UN MODÈLE	37
3.1.1. Nappe des alluvions du Gapeau : Grontmij et Rivages Environnement, 2014.....	37
3.1.2. Nappe des alluvions de l'Argens : Grontmij et Rivages Environnement, 2013.....	39
3.1.3. Entité hydrogéologique Mosson : BRGM, 2011.....	41
3.1.4. Sud Vendée : Calligée, 2008	41
3.1.5. Méthodes de calcul développées en Haute-Normandie : DREAL, 2010.....	44
3.2. APPROCHES PAR MODÉLISATION GLOBALE	46
3.2.1. Drôme des collines : Artelia, 2012a.....	46
3.2.2. Entité karstique Mosson : BRGM, 2011	49
3.2.3. Bassins versants crayeux de Champagne : BRGM, 2014b.....	50
3.2.4. Bassins versants bretons : méthodologie CRESEB, 2015.....	52
3.3. APPROCHES PAR MODÉLISATION SPATIALISÉE	54
3.3.1. Nappe des sables astiens : ANTEA, 2013	54
3.3.2. Plaine de Caen et bassin de la Dives : BRGM, 2014a	56

3.3.3. Nappe de la craie, bassin versant de la Somme : BRGM, 2014b.....	58
3.3.4. Nappes du Jurassique de Poitou Charentes BRGM, 2010	60
3.3.5. Nappe des alluvions fluvio-glaciaires de l'Est lyonnais : BURGEAP, 2010 et 2013.....	62
3.3.6. Nappe alluviale du Rhône, Péage de Roussillon : BRL / HYDROFIS, 2014/2015.....	63
3.3.7. Nappe des alluvions anciennes de Dijon Sud : BRL, 2011	65
3.3.8. Nappe alluviale de la basse vallée de l'Ain : Artelia, 2013	66
3.3.9. Nappe alluviale du Garon : BRL, 2013	68
3.3.10. Nappe alluviale de l'Ariège : BRGM, 2009.....	69
3.3.11. Nappes alluviales Giscle et Môle, ARTELIA / HGM, 2015	71
3.4. SCÉNARIOS D'EXPLOITATION DE LA RESSOURCE.....	74
3.4.1. Scénarios de réduction des prélèvements et effet du changement climatique	74
3.4.2. Scénarios exploratoires	76
4. Orientations méthodologiques.....	79
4.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE.....	79
4.2. CONCERTATION LOCALE	80
4.3. INVENTAIRE DES PRÉLÈVEMENTS ET REJETS	80
4.4. SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE	83
4.4.1. Modèle conceptuel hydrogéologique	83
4.4.2. Caractérisation des échanges nappe-rivière.....	86
4.4.3. Bilan hydrologique et calcul de la recharge	88
4.4.4. Problématique de l'intrusion saline	91
4.5. OBJECTIFS ENVIRONNEMENTAUX ET INDICATEURS DE GESTION	92
4.5.1. Objectifs environnementaux	92
4.5.2. Critères d'objectif.....	93
4.6. CHOIX DES MÉTHODES ET OUTILS	95
4.6.1. Analyse de l'historique des données.....	95
4.6.2. Choix des outils de modélisation	95
4.7. PRÉCONISATIONS RELATIVES À L'UTILISATION DES MODÈLES MAILLÉS	97
4.7.1. Recommandations générales	97
4.7.2. Préconisations relatives aux études EVP	98
4.7.3. Stratégies de simulation à privilégier	100
4.8. PRÉCONISATIONS RELATIVES À L'UTILISATION DES MODÈLES GLOBAUX (ET SEMI-GLOBAUX)	101
4.9. RÉSULTATS ET ACTUALISATION.....	103

5. Conclusions	105
6. Bibliographie	107

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schéma de détermination des volumes prélevables pour les eaux superficielles, extrait du cahier des charges « type » de l'AERMC.....	17
Illustration 2 : Répartition des études consultées par bassin hydrographique.....	19
Illustration 3 : Répartition des études consultées par maîtrise d'œuvre	20
Illustration 4 : Répartition des études consultées selon le contexte hydrogéologique.....	20
Illustration 5 : Répartition des études consultées selon les outils utilisés	23
Illustration 6 : Répartition des études consultées selon les méthodologies, les outils mis en œuvre et les contextes hydrogéologiques.....	23
Illustration 7 : Extrapolation des débits biologiques entre une station micro-habitat et un point de référence (extrapolation des courbes Débit/SPU sur les tronçons considérés comme homogènes) - extrait du rapport Artelia, 2012, Drôme des collines	28
Illustration 8 : Impact des prélèvements pour irrigation en nappe de la craie sur le débit des rivières (extrait du rapport BRGM/RP-61371-FR).....	32
Illustration 9 : Volumes prélevables et périodes concernées	35
Illustration 10 : Historique des prélèvements, des niveaux piézométriques et de la conductivité des eaux souterraines sur la nappe alluviale du Gapeau (extrait de Grondmij, 2014).....	38
Illustration 11 : Tableau récapitulatif des volumes annuels exploitables pour la nappe alluviale du Gapeau (extrait de Grondmij, 2014).....	39
Illustration 12 – Évolution des prélèvements par période avec report du volume maximum prélevable et indication des événements d'alerte (trait orange) déterminés par l'évolution des concentrations en chlorure (extrait du rapport Grondmij, 2013)	40
Illustration 13 - Niveaux année par année (ramenés à 0 au 1 ^{er} Juin) au piézomètre de Luçon (extrait du rapport Calligée N08-85138C)	42
Illustration 14 - Mise en évidence d'une relation linéaire entre niveaux de la nappe et volumes pompés au piézomètre de Luçon en période estivale pour chacune des années retenues (extrait du rapport Calligée N08-85138C)	42
Illustration 15 – Volumes spécifiques calculés à partir de plusieurs chroniques piézométriques du Sud Vendée (extrait du rapport Calligée N08-85138C).....	43
Illustration 16 – Relation entre le volume moyen exploitable en été et une cote donnée à respecter sur le secteur du Lay à partir des données du piézomètre de Luçon	44
Illustration 17 : Calcul de l'indicateur du bon état quantitatif des eaux superficielles pour les bassins versants de la Saône et de la Vienne (volumes prélevables inférieurs à 10 % du QMNA5) (DREAL Haute-Normandie).....	45
Illustration 18 – Schémas de principe du modèle semi-distribué à 2 réservoirs utilisé pour l'étude de la Drôme des collines (Artelia, 2012a) : principe général (en haut) et fonctionnement par tronçon de rivière (en bas).....	48
Illustration 19 : Exemple de l'impact d'un prélèvement sur le débit de la rivière selon Forkasiewicz et Peaudecerf, 1976 (extrait du rapport Artelia, 2012a – Drôme des collines)	48

Illustration 20 – Piézométrie simulée pour des prélèvements de 3 Mm ³ /an pour un scénario climatique décennal sec (à gauche) et un décennal humide (à droite) (BRGM, 2011). Le niveau piézométrique d’alerte (NPA) a été fixé à 1,2 m NGF	50
Illustration 21 – Relation entre débits moyen journalier de la Barbuise et niveaux piézométriques à Vailly en période de vidange de l’aquifère pour différentes années (Rapport BRGM/RP-61371-FR).....	50
Illustration 22 – Simulations prévisionnelles et évaluation des volumes disponibles en fonction de différents critères (débit d’alerte, QMNA5) pour l’Auve (Rapport BRGM/RP-61371-FR)	52
Illustration 23 – Modèle pluie-débit GR2M de l’IRSTEA et prise en compte des prélèvements (CRESEB, 2015).....	53
Illustration 24 – Comparaison mois par mois des volumes prélevés de 2009 à 2012 et des volumes prélevables de la nappe des sables astiens (ANTEA, 2013)	56
Illustration 25 – Baisse des prélèvements permettant de ne pas dépasser un impact des pompages supérieur à 30 % du QMNA5 naturel (Rapport BRGM/RP-62863-FR)	57
Illustration 26 : Débits de l’Auve à Moreuil simulés pour un scénario de réduction des prélèvements de 20 %.....	60
Illustration 27 – Volumes prélevables pour les 7 secteurs hydrogéologiques de la nappe alluviale du Péage de Roussillon (extrait du rapport BRLi/Hydrofisis, 2015).....	65
Illustration 28 : Calcul du volume prélevable sur la base d’un état piézométrique de référence (extrait du rapport BRGM/RP-57184-FR)	71
Illustration 29 : Débits simulés des rivières la Giscle et la Môle pour le mois d’août 2004 pour le scénario 7 (contour de la zone modélisée en rose) (extrait de ARTELIA / HGM, 2015)	73
Illustration 30 : Scénarios de réduction des prélèvements résultant de l’estimation des volumes prélevables (en gris : réduction de prélèvement non proposée)	75
Illustration 31 : Estimation des volumes prélevables et prise en compte du changement climatique.....	76
Illustration 32 : Scénarios exploratoires mis en œuvre dans les études consultées.....	78
Illustration 33 : Principales étapes qu’il conviendrait de suivre pour une étude d’estimation des volumes prélevables	79
Illustration 34 : Portail d’accès à la BNPE (http://www.bnpe.eaufrance.fr)	82
Illustration 35 : Exemples de schéma conceptuel hydrogéologique	84
Illustration 36 : Liste des principales données géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques et hydro-climatiques à collecter	85
Illustration 37 : Configuration hydrogéologique traitée par le modèle de Hunt (2003) pour l’impact d’un pompage sur le débit du cours d’eau	87
Illustration 38 : Restitution graphique proposée par le logiciel CONEXMIN (http://brgm.conexmin.fr).....	88
Illustration 39 : Page d’accueil de l’outil ESPERE	90
Illustration 40 : Exemple de décomposition d’hydrogrammes dans deux bassins de caractéristiques différentes et valeurs correspondantes du BFI (extrait du rapport BRGM/RP—FR, source : Gustard et al., 2009).....	91
Illustration 41 : Évolution de la conductivité en fonction de la profondeur et au cours du temps au droit d’un piézomètre à la Réunion (source : Charlier, Ladouche, Aunay, publication en cours)	92
Illustration 42 : Arbre de décision pour le choix des outils de modélisation (à croiser également avec les ressources disponibles pour faire l’étude).....	97

Liste des annexes

Annexe 1 – Récapitulatif des études consultées	111
---	------------

1. Cadre de l'étude

1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1.1.1. Circulaire du 30 juin 2008

Depuis plusieurs années, les études réalisées à la demande des administrations ou dans le cadre d'un SAGE pour évaluer les volumes d'eau prélevables dans les aquifères ou secteurs d'aquifère sont nombreuses, en particulier suite à la circulaire du 30 Juin 2008, relative à *"la résorption des déficits quantitatifs en matière de prélèvement d'eau et gestion collective des prélèvements d'irrigation"*.

La circulaire propose de distinguer deux aspects de la gestion quantitative de la ressource en eau : d'une part une **gestion structurelle**, pluriannuelle, qui permet de garantir le bon état d'une masse d'eau souterraine au titre de la DCE (Cf. § 1.1.2), tous usages confondus, et d'autre part une **gestion de crise (ou conjoncturelle)**, liée à des épisodes climatiques exceptionnels. Pour atteindre ces deux objectifs, elle introduit une notion fréquentielle fixant une borne au volume prélevable qui doit être tel qu'il permette de garantir statistiquement 8 années sur 10 le bon fonctionnement des milieux aquatiques correspondants (débits objectifs pour les cours d'eau en liaison hydraulique avec les nappes, zones humides, ...).

Au plan opératoire, ces deux aspects nécessitent donc :

- d'une part, de connaître la capacité de renouvellement de la ressource en eau souterraine (la recharge des nappes) pour la comparer aux prélèvements, tous usages confondus (Cf. § 1.1.2) ;
- d'autre part, de calculer des volumes prélevables, respectant 8 années sur 10 des objectifs environnementaux. Lorsque l'aquifère étudié est en relation avec le réseau hydrographique, il s'agit à la fois de préserver la ressource en eau souterraine et de garantir un soutien de nappe aux cours d'eau suffisant en période d'étiage. Le plus souvent, la finalité consiste donc ici à maintenir un débit minimum dans le cours d'eau à l'étiage.

Outre ces aspects temporels, les volumes prélevables sont indissociables de considérations spatiales (localisation des prélèvements). **Un volume prélevable est, en effet, associé à une configuration de prélèvements donnée.**

Si l'on ajoute à ces considérations temporelles et spatiales l'hétérogénéité et la complexité des systèmes aquifères rencontrés, on comprend que le concept de volumes prélevables, jusqu'à présent, ne se soit pas transcrit dans les études par une méthodologie unique (BRGM, 2014).

1.1.2. Définition du bon état quantitatif d'une masse d'eau souterraine au titre de la DCE

Selon l'article R212-12 du code de l'environnement, *« l'état quantitatif d'une eau souterraine est considéré comme bon lorsque les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement de la ressource disponible, compte tenu de la nécessaire alimentation en eau des écosystèmes aquatiques de surface et des zones humides directement dépendantes en application du principe de gestion équilibrée énoncé à l'article L. 211-1. [...] »*.

Cette définition reprend celle de l'article 2 de la DCE, selon lequel la « ressource disponible » d'eau souterraine correspond au « *taux moyen à long terme de la recharge totale de la masse d'eau souterraine moins le taux annuel à long terme de l'écoulement requis pour atteindre les objectifs de la qualité écologique des eaux de surface associées fixés à l'article 4, afin d'éviter toute diminution significative de l'état écologique de ces eaux et d'éviter toute dégradation significative des écosystèmes terrestres associés* ».

En pratique, les objectifs à atteindre pour le bon état quantitatif d'une masse d'eau souterraine sont :

- d'assurer un équilibre sur le long terme entre les volumes s'écoulant au profit des autres milieux ou d'autres nappes, les volumes captés et la recharge de chaque nappe ;
- d'éviter une altération significative de l'état chimique et/ou écologique des eaux de surface liée à une baisse d'origine anthropique du niveau piézométrique ;
- d'éviter une dégradation significative des écosystèmes terrestres dépendants des eaux souterraines en relation avec une baisse du niveau piézométrique ;
- d'empêcher toute invasion saline ou autre liée à une modification d'origine anthropique des écoulements.

Une masse d'eau souterraine n'est en bon état que si l'ensemble de ces objectif est respecté.

L'évaluation du bon état quantitatif consiste en la réalisation d'un certain nombre de tests : test « *balance prélèvement / ressource* », test « *eaux de surface* », test « *écosystèmes terrestres associés* » et test « *intrusion salée ou autre* ». Si pour au moins un test la masse d'eau est en état médiocre alors l'ensemble de la masse d'eau est classé en état quantitatif médiocre.

1.2. CADRE MÉTHODOLOGIQUE EXISTANT

Sur le bassin Rhône Méditerranée Corse, l'Agence de l'Eau (AERMC) a choisi d'engager une série d'études d'estimation des volumes prélevables à partir de 2009 sur la base d'une méthodologie commune. Pour cela, l'Agence a organisé deux rencontres avec les services de l'Etat, l'Onema et les bureaux d'études travaillant sur le sujet. Deux documents de cadrage méthodologique ont alors été produits :

- ✓ 2009 : Études de détermination des volumes maximums prélevables. Cahier des charges « type » (AERMC, DIRENS, ONEMA, avril 2009) ;
- ✓ 2011 : Méthodes des études volumes prélevables (Bureau du comité de bassin Rhône Méditerranée, séance du 10 juin 2011). Un premier retour d'expérience des études réalisées sur la base du cahier des charges « type » est dressé. Face aux incertitudes associées à l'évaluation des volumes prélevables, il était préconisé de clairement afficher les limites des méthodes et les difficultés rencontrées.

Le cahier des charges « type » élaboré se décline en six phases :

- 1) Caractérisation des sous bassins et aquifères et recueil de données complémentaires : pré-diagnostic visant à identifier les données manquantes pour répondre aux objectifs ;
- 2) Bilan des prélèvements existants, analyse de l'évolution (aux échéances 2015 et 2021). Différentes pistes sont répertoriées pour tendre vers l'exhaustivité (extrapolation des

prélèvements agricoles en fonction des surfaces irriguées, visites de terrain, évaluation des volumes restitués et des transferts d'eau). Concernant l'évolution future des prélèvements, il est demandé *a minima* de s'appuyer sur les projections de l'INSEE ainsi que sur l'évolution attendue des pratiques agricoles ;

- 3) Impact des prélèvements et quantification des ressources existantes. Trois cas de figure sont distingués : i) seules les eaux superficielles sont en déficit et les eaux souterraines contribuent faiblement au débit des cours d'eau, ii) le déficit est constaté à la fois sur les eaux superficielles et les eaux souterraines et iii) seules les eaux souterraines sont en déficit. La méthodologie proposée réside dans la reconstitution de l'hydrologie et/ou de la piézométrie non influencées (dites naturelles). Deux pistes sont évoquées pour la reconstitution de la piézométrie : conception ou ré-utilisation d'un modèle hydrodynamique si le bassin est suffisamment documenté ou approche simplifiée visant à estimer les entrées / sorties des différents aquifères ;
- 4) Détermination des débits minimum biologique¹ et des objectifs de niveau en nappe. Pour ces derniers, les niveaux piézométriques d'alerte (NPA) et les niveaux piézométriques de crise renforcée (NPCR) sur les points de référence du SDAGE doivent être consolidés et complétés par d'autres points le cas échéant. Il est précisé que « ces niveaux devront être fixés en cohérence avec les objectifs fixés sur les cours d'eau pour les nappes en connexion ». Le bureau d'étude étant libre de proposer une méthode de calcul des seuils (à valider par le Comité de pilotage) ;
- 5) Détermination des volumes prélevables tous usages confondus et des débits Objectif d'Étiage (DOE). La méthodologie est davantage contrainte pour les eaux superficielles (Cf. § 2.2.1, Illustration 1). Cette orientation du cahier des charges était dictée par des déficits quantitatifs alors essentiellement concentrés sur les eaux superficielles ;
- 6) Proposition de répartition des volumes entre les usages et proposition de périmètres d'organisme unique.

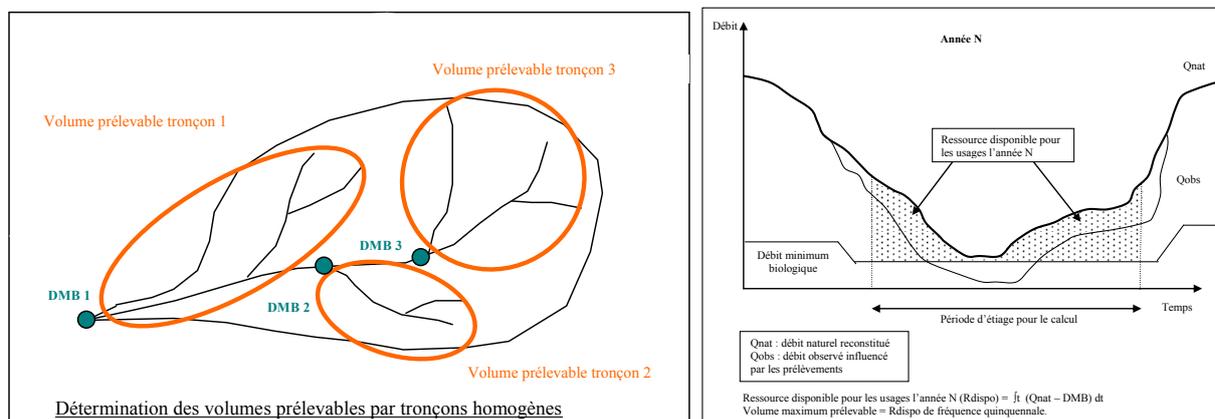


Illustration 1 : Schéma de détermination des volumes prélevables pour les eaux superficielles, extrait du cahier des charges « type » de l'AERMC

¹ Débit minimum à laisser dans une rivière pour garantir la vie, la circulation et la reproduction des espèces y vivant (macrophytes, poissons, macro invertébrés, ...). Il est souvent estimé en utilisant un outil de modélisation des habitats des différentes espèces de poissons.

1.3. OBJECTIFS ET PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE

Suite à la publication de plusieurs études ces dernières années (dont plus de 60 sur le bassin RMC) et aux difficultés d'évaluation des volumes prélevables rencontrées pour tenir compte à la fois des eaux de surface et des eaux souterraines, l'ONEMA a demandé au BRGM d'établir un premier retour d'expérience sur la détermination des volumes prélevables pour les **aquifères à nappe libre**.

L'étude s'est déroulée sur deux années (2014-2015). La première phase avait pour objectif de compiler un panel d'études réalisées en examinant plus particulièrement les démarches et méthodes mises en œuvre, les difficultés rencontrées ainsi que les principales incertitudes associées aux estimations. Il faut souligner que ce travail a été poursuivi en année 2 avec l'analyse d'études plus récentes et/ou jugées intéressantes par les différents acteurs consultés. La deuxième phase consistait à préconiser une démarche et des méthodes pour mieux prendre en compte les nappes dans les études d'estimation des volumes prélevables.

La mission confiée au BRGM par l'ONEMA ne visait pas à expertiser les études consultées que ce soit du point de vue des résultats ou des outils utilisés.

Le travail de capitalisation des méthodes utilisées fait l'objet des chapitres 2 et 3 du présent rapport. Des résultats en termes de scénarios d'exploitation de la ressource en eau sont présentés à la fin du chapitre 3.

En prenant appui sur ce premier bilan, des orientations méthodologiques sont proposées dans le chapitre 4.

Cette analyse et les préconisations associées pourront donc servir de point d'appui pour des études ultérieures, voire la révision de certains volumes exploitables. La circulaire 2008 indique d'ailleurs que *"ce volume prélevable devra donc être actualisé au fur et à mesure de l'amélioration des connaissances scientifiques, des modifications de répartition entre usages et de l'hydrométrie"*.

2. Études consultées et difficultés rencontrées

Les références de tous les documents consultés sont répertoriées au chapitre Références bibliographiques (§ 6). En outre, un tableau récapitulatif des études consultées est reporté en Annexe 1, plusieurs éléments d'information y sont rapportés : site d'étude, bassin hydrographique, année de réalisation, maître d'œuvre, méthode appliquée, outils utilisés, critères d'objectif, renvoi vers le(s) paragraphe(s) du rapport concerné(s).

Les études réalisées sur le bassin RMC sont accessibles sur le site internet de l'Agence de l'Eau.

2.1. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES ÉTUDES

Au total, 32 études d'Estimation des Volumes Prélevables (études EVP dans la suite du rapport) ont été compilées. Un premier panel d'études nous a été communiqué par l'ONEMA, puis complété par des rapports BRGM et des études vers lesquelles nous ont orienté les Agences de l'Eau.

À quelques exceptions près (trois études sur le bassin Adour-Garonne de 2009, une sur Loire Bretagne de 2008), il s'agit d'études récentes, postérieures à 2011.

La majorité des études consultées concerne le bassin Rhône Méditerranée et Corse (Illustration 2). Il s'agit, en effet, du premier territoire à avoir lancé à grande échelle des études EVP sur tous les bassins identifiés en potentiel déficit quantitatif :

Bassin hydrographique	Nombre d'études
Rhône Méditerranée Corse	21
Loire Bretagne	4
Adour Garonne	3
Artois-Picardie	2
Seine Normandie	1
Rhin Meuse	1
Total	32

Illustration 2 : Répartition des études consultées par bassin hydrographique

Les études recueillies ont été conduites par de nombreux maîtres d'œuvre (Illustration 3).

Du point de vue hydrogéologique, même si les contextes de nappes alluviales sont les plus représentés, nous observons une variété des milieux aquifères et des relations eaux souterraines / eaux superficielles (Illustration 4).

Il faut cependant noter l'absence des aquifères de socle dans les études analysées. Aucune étude EVP ne semble par exemple avoir actuellement été lancée sur les territoires associés (Bretagne, Limousin, Corse, ...). En revanche, le guide intitulé « Débit Minimum Biologique et gestion quantitative de la ressource en eau » élaboré par le pôle Ecohydraulique ONEMA-IRSTEA, l'INRA et les Universités Rennes 1 et Rennes 2 pour le CRESEB fait partie des

documents consultés (CRESEB, 2015²). Au-delà de l'estimation du DB, une méthodologie est préconisée pour prendre en compte la contribution des aquifères aux écoulements de base des cours d'eau bretons : étude du tarissement des cours d'eau (temps de vidange) et modélisation globale pluie-débit. Le contenu est discuté dans le chapitre 3.

Même si l'action se limitait initialement à l'étude des nappes libres, quelques cas d'étude traitent d'aquifères en partie captifs : graviers profonds de la Tille (SAFEGE, 2012), sables astiens (ANTEA, 2013), Grès du Trias inférieur (BRGM, 2011).

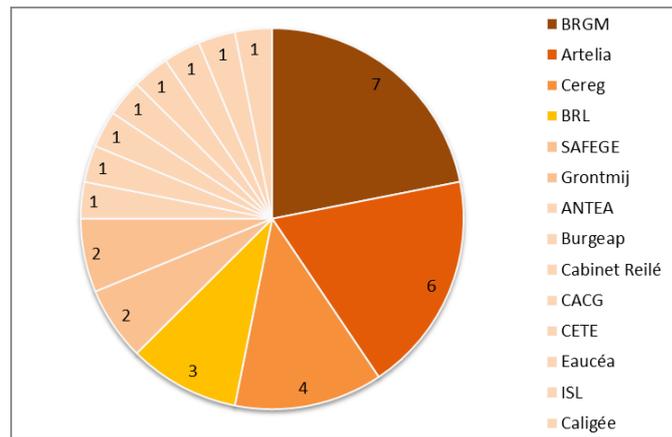


Illustration 3 : Répartition des études consultées par maîtrise d'œuvre

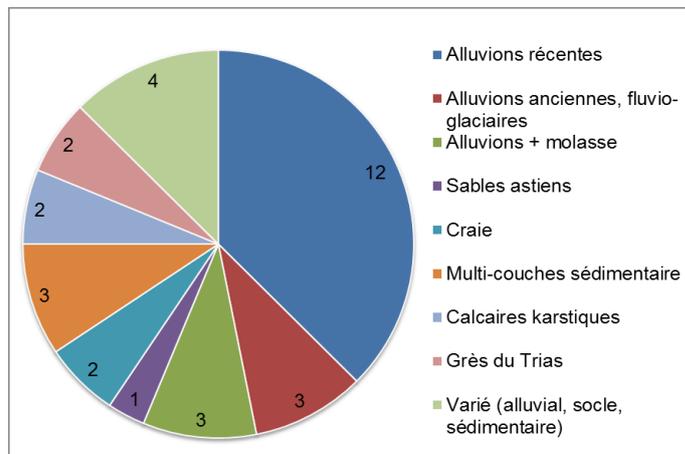


Illustration 4 : Répartition des études consultées selon le contexte hydrogéologique

²Disponible sur le site

http://www.creseb.fr/index.php?option=com_remository&Itemid=200064&func=startdown&id=423

2.2. DÉMARCHES GÉNÉRALES

Les études EVP consultées peuvent tout d'abord se classer en deux grandes catégories :

- 1) une première catégorie où la ressource en eau est abordée dans sa globalité, c'est-à-dire sans distinguer eaux superficielles et eaux souterraines. Cela concerne 5 des 32 études examinées ;
- 2) une deuxième catégorie où la ressource en eau souterraine est différenciée, mais de façon plus ou moins explicite selon les études.

2.2.1. Eaux superficielles et eaux souterraines non différenciées

Pour cette première catégorie d'études, les eaux souterraines ne sont pas considérées en tant que telle et la méthodologie déployée s'appuie sur le volet eaux superficielles du cahier des charges « type » proposé par l'Agence de l'Eau RMC (§ 1.2).

Les volumes prélevables sont alors déterminés, après reconstitution d'une chronique de débits non influencés (dit naturalisés), sur la base du respect d'un débit de référence du cours d'eau, le Débit Biologique dans la grande majorité des cas (Illustration 1). Pour ce faire, un modèle global pluie-débit est le plus souvent utilisé.

Les échanges nappe-rivière ne sont donc pas appréhendés même si dans quelques cas, des relations entre niveaux piézométriques et débit d'étiage ont été recherchées, mais à chaque fois sans succès (relation non univoque). Seules les chroniques de débits sont finalement exploitées dans ces études.

Les pompages en nappe alluviale sont ici considérés comme des prélèvements directs aux cours d'eau, et les pressions exercées sur les autres nappes sont le plus souvent non prises en compte dans l'étude.

Du point de vue de la nature des hydrosystèmes, ces études concernent des cours d'eau avec une nappe alluviale fortement connectée mais également d'autres contextes géologiques : superposition de plusieurs aquifères, géologie variée à l'affleurement.

Cette démarche n'apparaît pas satisfaisante pour les bassins versants où la majorité des prélèvements se fait en nappe et/ou plusieurs aquifères sont en jeu. Dans la mesure du possible, il convient de justifier davantage l'application de cette démarche par une analyse hydrogéologique qui viendrait éventuellement démontrer que les hypothèses faites sont acceptables. Néanmoins, cette approche est parfois justifiée par les bureaux d'étude par l'absence de données sur les eaux souterraines (en termes de fonctionnement et d'exploitation).

Ces études ne sont pas considérées dans la suite de l'analyse.

2.2.2. Eaux souterraines différenciées

Dans la suite du présent rapport, nous nous intéresserons à cette deuxième catégorie d'étude où la prise en compte du compartiment souterrain est explicite.

Les approches développées apparaissent très hétérogènes, à la fois dans la définition des indicateurs d'objectif (débits, niveaux piézométriques, recharge, bilan entrées/sorties, etc.), dans la prise en compte des 8 années sur 10 où l'équilibre quantitatif doit être assuré ou encore dans les outils utilisés.

Les Illustration 5 et Illustration 6 présentent la répartition des études consultées selon les outils et les approches mises en œuvre.

Dans la majorité des études, les volumes prélevables ont été déterminés après utilisation de modèles numériques. On distinguera les modèles globaux dans lesquels le bassin est représenté comme une entité spatiale homogène (modèles à réservoirs ou modèles de type boîte noire) et les modèles hydrodynamiques spatialisés.

Plusieurs études ont tout de même été conduites sans recourir à un outil de modélisation, en s'appuyant principalement sur une analyse historique des données disponibles (débit, piézométrie, conductivité de l'eau, précipitations et prélèvements). Cela peut passer par un simple retour d'expérience sur des années de référence jusqu'au développement d'une méthodologie spécifique déduite de l'analyse des chroniques de données.

Dans quelques cas d'étude, les deux approches (avec et sans modélisation) ont été confrontées.

Parmi les logiciels utilisés, on retrouve :

- modèle global de type boîte noire : logiciel TEMPO (1) ;
- modèles globaux à réservoirs : NAM (1), GARDENIA (1). À noter que le logiciel utilisé par Artelia dans 3 études n'est pas précisé (§ 3.2.1) ;
- modèles maillés : Modflow (6), Marthe (5), Feflow (1), Talisman (1) et Horizons (1).

Concernant le couplage de plusieurs modèles, l'approche proposée par Cereg-Ingénierie pour les bassins versants du Lez et de l'Eygues pose question. Différents outils sont emboîtés afin de caractériser les échanges entre les cours d'eau, la nappe alluviale et la nappe sous-jacente dite régionale (miocène et alluvions anciennes). Sont ainsi utilisés un modèle de surface (logiciel Athys développé par l'IRD), un modèle maillé (Modflow) pour quantifier les apports de la nappe régionale au système nappe alluviale / cours d'eau et un modèle de la nappe alluviale développée sous Excel© et dont les données d'entrée proviennent des deux premiers modèles.

Dans le cas présent, le logiciel Modflow aurait à lui seul permis de modéliser un tel hydrosystème avec prise en compte des échanges entre eaux souterraines et eaux superficielles. Une telle complexification ne semble, par conséquent, pas justifiée.

En définitive, au regard de la forte hétérogénéité des approches, il nous a semblé important de proposer un « catalogue » descriptif de différents cas d'étude pour lesquels la méthodologie élaborée a été jugé intéressante. Ces exemples permettront d'alimenter la réflexion sur l'estimation des volumes prélevables, en cours ou à venir sur certains

territoires. De nombreux cas d'étude sont ainsi brièvement présentés au chapitre 3 du présent rapport.

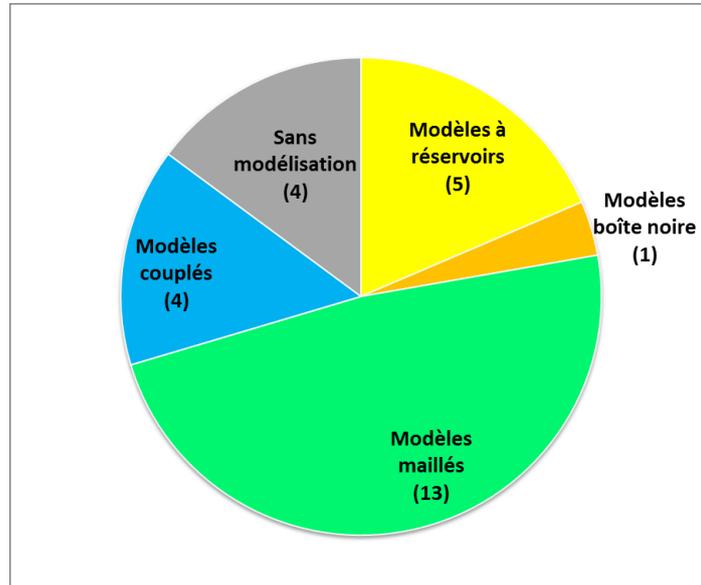


Illustration 5 : Répartition des études consultées selon les outils utilisés

Contexte géologique	Outils							
	Bilan hydrologique manuel	Analyse historique des données	Modèle boîte noire + analyse historique	Modèle à réservoirs	Modèle à réservoirs semi-distribué + solution analytique	Modèle maillé	Modèle maillé + analyse historique	Modèles couplés
Alluvions récentes		2	1			4	1	2
Alluvions anciennes, fluvioglaciales						2	1	
Alluvions + molasse					3			
Sables astiens						1		
Craie				1		1		
Multicouches sédimentaire		1				2		
Calcaires karstiques			1					
Grès du Trias	1					1		
Varié (alluvial, socle, sédimentaire,...)								2

Illustration 6 : Répartition des études consultées selon les méthodologies, les outils mis en œuvre et les contextes hydrogéologiques

2.3. PRINCIPALES DIFFICULTÉS MENTIONNÉES DANS LES ÉTUDES

En préambule, il est important de rappeler que les auteurs des études ont dû s'adapter aux données et outils disponibles ainsi qu'à un état des connaissances fortement variable d'un secteur à l'autre.

L'objectif de ce paragraphe est de faire état des principales difficultés rencontrées et de souligner les limites des outils et méthodologies mises en œuvre. Les points ici discutés sont généralement rapportés dans les rapports d'étude ; nous avons donc pris le parti de les illustrer par l'intermédiaire d'extraits de rapport. L'inventaire ainsi dressé ne prétend pas à l'exhaustivité.

2.3.1. Disponibilité des données

Du point de vue des données à collecter, les principales difficultés identifiées concernent, sans surprise, les prélèvements et les chroniques de données relatives au suivi de la ressource en eau (débit, niveaux piézométriques, conductivité électrique dans le cas des aquifères littoraux).

Prélèvements et restitution au milieu

La méconnaissance des pressions de prélèvement exercées sur la ressource concerne plus particulièrement les usages agricoles et domestiques. Dans plusieurs études, l'usage domestique a été négligé faute d'information. Quel que soit l'usage, il apparaît difficile de récupérer des données précises pour des périodes anciennes (*ante* 2000).

Pour l'usage agricole, il est fréquent, en l'absence de compteur, que les études reposent sur des volumes autorisés et non prélevés. Les volumes sont donc potentiellement surestimés.

En outre, la répartition saisonnière des prélèvements est rarement connue ; or, pour les études d'estimation des volumes prélevables, il apparaît indispensable de travailler *a minima* au pas de temps mensuel.

Extrait du rapport Eaucéa, 2011 (SAGE Cher amont) :

« La seule connaissance du volume d'irrigation annuel ne permet pas d'avoir une idée sur la répartition de ce volume au sein de la campagne d'irrigation. Si les usages AEP et industriels sont globalement constants au cours de l'étiage, ce n'est pas le cas de l'irrigation, qui possède des dates de démarrage et de fin ainsi que des périodes de pointe ou de ralentissement des prélèvements très largement variables au sein de l'été, notamment liées aux conditions agro-climatiques. L'étalement sur la période d'irrigation du volume annuel est une hypothèse beaucoup trop approximative ; il est essentiel de connaître le régime des prélèvements agricoles qui, croisé avec le régime de disponibilité de la ressource naturelle (débits des cours d'eau et nappes), pourra impacter plus ou moins le niveau d'étiage des bassins versants.

Pour ce faire, il est proposé de partir des surfaces irriguées, qui seront ensuite croisées avec les besoins d'irrigation unitaires journaliers, afin de décrire le régime journalier des prélèvements agricoles. »

Extrait du rapport ANTEA, 2013 (Nappe des Sables astiens) :

« Une cinquantaine d'ouvrages déclarés exploitent la nappe pour des besoins agricoles (vignoble, maraîchage). Ce chiffre paraît réduit par rapport aux nombreuses exploitations (4700) dénombrées sur le secteur d'étude.

De nombreux ouvrages ne disposent pas d'équipement de mesure, le volume affecté étant alors estimé et/ou repris par rapport aux années précédentes. »

Concernant l'usage domestique, *« il s'agit en nombre de la principale exploitation de la nappe astienne. La difficulté réside ici dans la difficulté à tendre vers un inventaire exhaustif, de très nombreux ouvrages n'étant pas recensés ou n'ayant aucun moyen de comptage des volumes prélevés (...) En effet,*

l'impact des prélèvements modélisés est surestimé puisque le volume prélevé à des fins domestiques n'est pas intégré. »

Extrait du rapport BRL, 2013 (nappe alluviale du Garon) :

« La collecte des données de prélèvements en phase 1 de l'étude fait apparaître une incertitude sur la réalité des prélèvements par le passé. L'étude BURGEAP de référence (2008) était basée sur des prélèvements estimés autour de 5 Mm³/an de 1998 à 2005 ; or, les données collectées montrent des volumes cumulés légèrement supérieurs à 7 Mm³/an sur la même période. »

Pour les bassins versants où sont présents des canaux de dérivation, parfois le principal prélèvement du cours d'eau, l'absence de suivi continu des débits dérivés est une source d'incertitude importante :

Extrait du rapport SAFEGE, 2013 (plaine alluviale du Breuchin-Lanterne) :

« Dans le cas de la présente analyse, ce problème s'est posé, mais est resté très mineur en comparaison des incertitudes sur le volume prélevé dans le Breuchin pour l'alimentation du canal du Morbief : ce prélèvement constitue en effet, et de loin, le principal besoin sur l'ensemble de la zone d'étude. Le manque d'informations disponibles a conduit à construire une chronique de prélèvements basée sur des observations faites durant l'été 2012, qui ne représentent pas forcément les modalités de gestion de l'ouvrage de prise d'eau sur les 12 dernières années. À ce titre, cela représente une source d'incertitudes importante. Il ne sera pas possible de résorber ces incertitudes sans une amélioration de la connaissance sur les modalités de gestion de l'ouvrage du Morbief. »

La question des restitutions au milieu (STEP, canaux d'irrigation, etc.) est le plus souvent traitée mais avec des approximations faute de mesures.

En définitive, l'évaluation des prélèvements nécessite de nombreuses approximations et extrapolations (aux périodes anciennes, à un pas de temps mensuel voire journalier, etc.) et se trouve par conséquent entachée d'une forte incertitude.

Par exemple, pour les études consistant à naturaliser les débits (reconstitution des débits naturels), l'erreur d'estimation sur les prélèvements exercés se répercute directement sur les volumes prélevables : **si les prélèvements sont sous-estimés, le débit naturel et les volumes prélevables seront sous-estimés par voie de conséquence.**

Une contestation enregistrée par la DREAL Rhône Alpes s'appuie, par exemple, sur cette méconnaissance des prélèvements et les approximations résultantes pour s'opposer à l'estimation des volumes prélevables (bassin de la Beaume Drobie).

Suivi des ressources en eau

L'absence de chroniques de suivi des débits et/ou des niveaux piézométriques de longue durée constitue souvent un frein à l'évaluation des volumes prélevables, et ce quelle que soit l'approche suivie (avec ou sans modélisation).

Dans certains cas, l'évaluation n'a pas pu être conduite faute d'informations disponibles sur la ressource en eau souterraine. Trois exemples sont rapportés ci-après :

Extrait du rapport CETE, 2011 (Département de l'Allier) :

« Le peu de données piézométriques et le manque d'informations quant aux nappes souterraines sollicitées par les forages d'irrigation ne permettent pas de caractériser un volume prélevable sur chacune de ces ressources souterraines. ». Dans le cas présent, l'évaluation s'est limitée à la présentation des prélèvements maximaux effectués sur les eaux souterraines profondes sur la période 1996-2009 (pendant et hors période d'étiage).

Extrait du rapport BRGM, 2011 (entité Mosson) :

« L'étude hydrogéologique menée sur l'entité Mosson de la masse d'eau FR_DO_124 « Calcaires jurassiques Pli ouest de Montpellier et Massif de la Gardiole » a mis en évidence l'hétérogénéité des connaissances sur les deux compartiments. Le compartiment Nord présente peu de données exploitables, ce qui ne permet pas aujourd'hui la caractérisation de son fonctionnement, ni la définition d'un niveau piézométrique de référence ou d'un volume prélevable. »

Extrait du rapport Artelia, 2013 (bassin de l'Ouvèze de l'Ardèche) :

« Dans l'état actuel des données quantitatives disponibles, nous ne sommes pas capables de calculer des volumes prélevables sur cet aquifère.

En effet, les seules données que nous avons en notre disposition sont les suivis des niveaux de nappe avec les volumes annuels prélevés sur les 3 forages exploités par le SEBP. Nous avons également quelques jaugeages ponctuels sur certaines sources captant le Trias.

Par conséquent, nous pouvons simplement estimer les volumes prélevables pour chaque forage (...) Ces limites correspondent aux niveaux statiques d'alertes établis sur la base du tiers de la hauteur aquifère à ne pas dépasser. »

Les travaux de modélisation doivent reposer, en entrée comme en sortie, sur des chroniques de données de longue durée. Il est, en effet, important de caler les modèles sur des durées suffisamment longues dans le but de couvrir des conditions climatiques variées et plusieurs cycles hydrologiques. Ce point est donc particulièrement critique lorsqu'on s'intéresse aux étiages ou encore à des nappes à forte inertie (à cycles pluriannuels). Or, parmi les études consultées, **les périodes de calage des modèles sont parfois jugées insuffisantes** (durée inférieure à 5 ans, Cf. exemple suivant) :

Extrait du rapport CEREG, 2013 et 2014 (bassins du Lez et de l'Aygues) :

« Les stations hydrométriques du SMBVL seront utilisées pour le calage du modèle hydrologique. Les données de 2010 ne sont pas complètes sur toutes les stations du Lez et des affluents notamment en période d'étiage. Le calage des débits se réalisera donc sur l'année 2011. L'année 2010 ne sera utilisée qu'à titre vérificatif. »

Le calage d'un modèle (global comme maillé) doit par ailleurs être validé, cela consiste à confronter les valeurs simulées à celles observées pour une période non utilisée durant la phase de calage. Aussi, **faute de chroniques de données suffisamment longues, le calage des modèles a rarement été validé**. Le risque est alors de disposer de modèles non représentatifs de conditions hydrologiques différentes de la période de calage.

La robustesse de certains modèles peut enfin être remise en cause en raison du peu voire de l'absence de points d'observation (stations hydrologiques et piézomètres) sur lesquels s'appuie une calibration :

Extrait du rapport BRL, 2013 (nappe alluviale du Garon) :

« Cette absence conduit à un premier biais méthodologique certain : si le modèle sera bien calé en terme de piézométrie (nombreuses chroniques disponibles), les valeurs de flux aux limites du domaine modélisé n'auront été ni calées, ni validées. Ce sera le cas des débits d'échange entre nappe et rivière. Ces valeurs devront donc être considérées avec prudence. »

Extrait du rapport Artelia, 2012 (bassin de la Véore Barberolle) :

« Le modèle est ensuite calé en régime transitoire entre septembre 1997 et septembre 2008, période sur laquelle nous disposons d'informations. Il n'existe que 3 chroniques piézométriques pour caler le modèle. »

Définition des débits d'objectif

Le débit d'objectif et les incertitudes associées impactant directement l'évaluation des volumes prélevables ; le choix de ce débit de référence et sa méthode d'estimation apparaissent donc comme une étape primordiale des études EVP (Cf. § 4.5.2).

Dans les études consultées, différentes valeurs de débits ont été utilisées, en majorité les Débits Biologiques (DB) et les Débits Objectifs d'Etiage³ (DOE) issus des SDAGE, mais également plus ponctuellement des débits statistiques (QMNA5⁴, VCN30⁵,...) ou des débits issus d'arrêtés sécheresse. Plus le débit retenu sera faible, plus le volume prélevable évalué sera important :

Extrait du rapport CETE, 2011 (Département de l'Allier) :

« Parmi les hypothèses ayant influencé de manière cruciale la détermination des volumes, on trouve : les seuils du SDAGE (DOE) et de l'arrêté sécheresse. Des seuils plus bas ou plus hauts auraient conduit à des diagnostics et des valeurs différents. »

Tout d'abord, l'incertitude sur les mesures de débits est significative, particulièrement en période d'étiage. Le bureau du comité de bassin Rhône Méditerranée évoque **des marges d'incertitude moyennes de 10 à 20 % pour les débits mesurés aux stations** (AE-RMC, 2011). Ces incertitudes sont reconnues supérieures pour les faibles débits. Or, celles-ci se répercuteront directement sur l'évaluation de la plupart des débits d'objectif utilisés pour estimer les volumes prélevables.

Il ne s'agit pas ici de revenir sur les méthodologies d'évaluation des débits biologiques (DB), largement discutées par l'Agence de l'Eau RMC, l'IRSTEA et l'ONEMA (2013), mais il faut garder à l'esprit les fortes incertitudes liées à cette évaluation. Face à ces dernières, il est par exemple préconisé dans le bassin RMC de proposer des fourchettes de valeurs pour les DB et les volumes prélevables qui en découlent. Il faut signaler que si cette recommandation est souvent suivie pour les DB, elle ne l'est que très rarement pour les volumes prélevables.

Par ailleurs, au-delà des incertitudes associées à la définition des débits d'objectif, l'homogénéité des résultats présentés est remise en question lorsque celle-ci varie d'une unité de gestion à l'autre au sein d'une même étude : issus du SDAGE, d'arrêtés sécheresse, débits biologiques ou calculés à partir de débits statistiques (QMNA5, etc.).

La non homogénéité des débits d'objectif au sein d'un même bassin versant est parfois issue de l'impossibilité de travailler à partir des débits biologiques préalablement définis. C'est par exemple souvent le cas pour les cours d'eau aux étiages marqués (assecs naturels) :

Extrait du rapport Artelia, 2013 (Drôme des collines) :

« Par rapport au cahier des charges initial, nous avons éprouvé des difficultés pour définir un volume prélevable compatible avec les débits biologiques. En effet, les propositions de débits biologiques réalisées aux stations micro-habitat montrent que ces débits seuils seraient assez souvent dépassés à la

³ Valeur de débit d'étiage en un point (au point nodal) au-dessus de laquelle il est considéré que l'ensemble des usages (activités, prélèvements, rejets,...) en aval est en équilibre avec le bon fonctionnement du milieu aquatique. C'est un objectif structurel, arrêté dans les SDAGE, SAGE et documents équivalents (source : www.eaufrance.fr)

⁴ Débit mensuel minimal de période de retour 5 ans

⁵ Débit moyen minimal annuel calculé sur 30 jours consécutifs

baisse sur les périodes d'étiage, et ce de manière naturelle, en particulier du fait de la morphologie des cours d'eau et de la sévérité des étiages. »

En région Rhône Alpes, pour les cours d'eau à influence méditerranéenne ou cévenole, les DB sont souvent dépassés en condition naturelle. Cela caractérise ainsi des cours d'eau pour lesquels l'hydrologie d'étiage limite naturellement les habitats. Dans de tels contextes, l'utilisation du DB dans les études EVP peut s'avérer non pertinente.

Enfin, notons que les stations au droit desquelles sont évalués les DB ne correspondent pas forcément aux stations de jaugeage sur lesquelles s'appuient les études pour les travaux de modélisation. Il est alors nécessaire d'extrapoler le DB plus en amont ou plus en aval avec des conditions hydrologiques et des pressions pouvant différer. Cette limite est clairement explicitée par Artelia (Illustration 7) :

Extrait du rapport Artelia, 2013 (Drôme des collines) :

« Cette approche reste vraiment exploratoire et ne saurait remplacer une analyse micro-habitat à l'endroit d'intérêt. En l'absence de guide méthodologique clair sur ces questions d'extrapolation de débit biologique hors des cas d'ouvrage de régulation des débits (barrages), il s'agit plus d'ébauches de pistes de recherche que d'un travail permettant une gestion rigoureuse du bassin. »

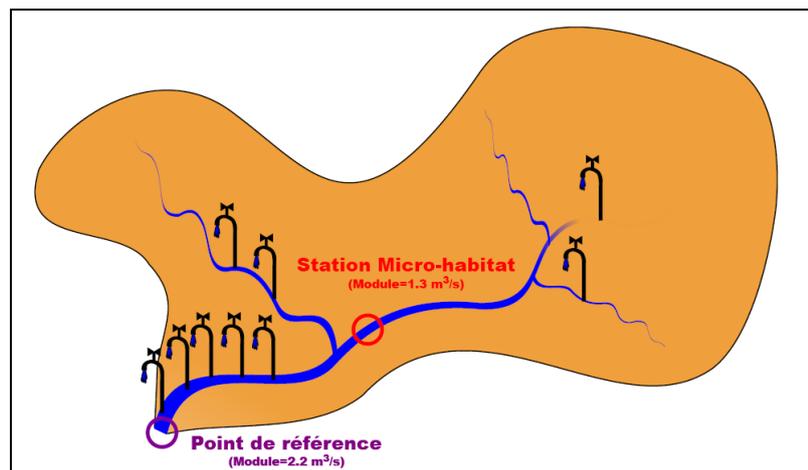


Illustration 7 : Extrapolation des débits biologiques entre une station micro-habitat et un point de référence (extrapolation des courbes Débit/SPU sur les tronçons considérés comme homogènes) - extrait du rapport Artelia, 2012, Drôme des collines

2.3.2. Limites associées aux modèles maillés utilisées dans l'évaluation

L'objectif est de présenter quelques exemples mettant en lumière des biais méthodologiques associés à l'utilisation des modèles spatialisés dans le cadre des études EVP. Il ne s'agit pas ici d'expertiser les modèles utilisés ni de dresser une liste des incertitudes pouvant affecter les résultats d'une modélisation spatialisée.

Les bonnes pratiques en matière de modélisation maillée des écoulements souterrains et leurs conditions d'application sont rappelées au chapitre 4.

Objectifs initiaux du modèle maillé

Dans plusieurs cas d'étude, les modèles maillés exploités dans le cadre des études EVP ont été développés antérieurement avec des objectifs opérationnels potentiellement différents. Or, les objectifs initiaux vont conditionner le type de modèle à mettre en œuvre, en particulier pour définir l'extension du domaine modélisé et la gestion du réseau hydrographique.

Comme dans le cas du SAGE Grès du Trias Inférieur (cf. ci-dessous), le modèle maillé utilisé ne peut alors apporter qu'une réponse partielle en raison d'une extension insuffisante pour traiter la partie libre de l'aquifère des grès du Trias inférieur. Dans le cas présent, cela n'apparaît pas préjudiciable pour ce secteur peu exploité actuellement.

Extrait du rapport BRGM, 2012 (SAGE GTI) :

« Compte tenu de la structure actuelle du modèle hydrogéologique, le calcul du volume prélevable tel que défini n'a de signification que pour les secteurs éloignés des limites d'alimentation dont le niveau est considéré comme constant. Le volume prélevable n'est donc pas calculé pour le secteur sud-est, qui est un secteur à la fois très bien alimenté par l'infiltration d'eau de pluie et peu exploité. Une révision des limites du modèle pour ce secteur (modélisation des affleurements) sera nécessaire si l'on souhaite estimer l'éventuelle baisse des débits d'étiages des cours d'eau en cas d'augmentation importante des prélèvements à proximité de la limite nappe libre / nappe captive. »

Dans le cadre du bassin versant de la Somme (BRGM, 2014b), le modèle utilisé a été initialement conçu pour étudier le rôle des eaux souterraines dans les inondations survenues en 2001. Le calage du modèle avait donc été ciblé sur les périodes de hautes eaux. Dans un tel cas de figure, la reprise du calage, impérative afin d'utiliser le modèle dans le cadre d'une étude EVP, a été effectuée.

Schéma conceptuel hydrogéologique

La définition du modèle conceptuel d'écoulement est au centre de la construction d'un modèle maillé. Il détermine la géométrie du système aquifère à modéliser, les conditions hydrauliques aux limites du modèle, la nature des relations nappe-rivière, etc.

Or, la connaissance des hydrosystèmes étudiés n'étant que rarement complète, les rapports consultés font état des incertitudes voire des biais résultant des hypothèses prises lors de la construction du modèle. À titre d'exemple, trois extraits de rapport sont proposés ci-après, ils illustrent de façon qualitative l'impact des hypothèses faites sur l'évaluation des volumes prélevables :

Extrait du rapport Cereq, 2013 (bassin versant du Lez) :

« Il faut noter que la condition limite appliqué à l'extrême aval du bassin versant (BV10) rend incohérent les résultats sans que cela ait d'impact sur les bassins amont. Les volumes drainés sont vraisemblablement surestimés du fait que le drainage constitue la seule sortie possible de l'eau souterraine. Il y a donc lieu de considérer avec prudence les valeurs du drainage de ces sous-bassins aval. Dans la partie aval du bassin versant du Lez, alors que l'extension de l'aquifère régional a été limitée à celle de la molasse, la présence des alluvions peut permettre en effet un écoulement important d'eau. La non-prise en compte de cet écoulement dans le modèle implique que tout le débit souterrain soit drainé dans les derniers sous-bassins. »

Extrait du rapport BRL, 2013 (nappe alluviale du Garon) :

« Dit autrement, si la révision du modèle conceptuel de la nappe comme nous la proposons est essentielle dans la compréhension du fonctionnement global de la masse d'eau, il est fort probable que le

fait de simuler une limite à flux nul sous le seuil des Barolles ait peu d'impact sur la capacité du modèle à déterminer les volumes prélevables (sous réserve d'une minoration des volumes de recharge).

Cependant, il est possible que pour des conditions climatiques différentes de celles observées durant la période de calage, des biais apparaissent (notamment en termes d'échanges entre masses d'eau) et fragilisent la signification des résultats.

Il aurait fallu étendre le domaine modélisé jusqu'aux sources. Cependant, après vérification de la disponibilité des données auprès des organismes concernés, il apparaît un déficit important d'informations sur le secteur des sources de la Mouche (géométrie de l'aquifère, suivi piézométrique, données de prélèvements, chroniques de débit sur les sources...). »

Extrait du rapport BRGM, 2014b (nappe de la craie, bassin versant de la Somme) :

« Enfin, il convient de souligner que les résultats présentés doivent être regardés en intégrant les limites du modèle et de la connaissance actuelle du système ; en particulier 1) l'incertitude sur les débits, les prélèvements et leur répartition dans le temps, 2) l'hétérogénéité verticale de la craie fracturée et la complexité de son comportement, 3) le maillage de 500 m x 500 m qui schématise les échanges nappe/rivière, 4) la non prise en compte du rôle des marais et des étangs dans le modèle. Il faut donc considérer les chiffres fournis dans ce travail comme des ordres de grandeur et les utiliser comme éléments d'aide à la décision. »

Une limite rencontrée à plusieurs reprises concerne la quantification des échanges entre l'aquifère modélisé et les aquifères sous-jacents ou bordiers (non intégrés au modèle). Des flux imposés sont alors le plus souvent appliqués sans validation possible. Si de tels procédés peuvent permettre de reproduire la piézométrie de l'aquifère, ils ne sont pas sans risques dans l'exploitation du modèle.

Distribution des paramètres hydrodynamiques

Lors du calage d'un modèle maillé, des valeurs de paramètres hydrodynamiques non réalistes sont parfois affectées à certains secteurs afin d'éviter certains phénomènes intempestifs (dénoyage local, etc.). Si ces ajustements permettent de représenter la piézométrie observée, ils peuvent entraîner un biais certain en condition de pompage.

Extrait du rapport ANTEA, 2013 (Nappe des Sables astiens) :

Le principal artefact concerne le piézomètre 1782 (UG7), pour lequel la modification des prélèvements ne permet pas de modifier sensiblement les niveaux. Ceci est lié à la spécificité du modèle, les mailles dans ce secteur ayant été affectées d'une très forte perméabilité afin a priori d'intégrer l'incidence locale de la présence de l'Hérault sur le fonctionnement de la nappe.

Dans le secteur concerné, les volumes prélevables pourraient alors être largement surestimés.

Stratégie de simulations

Les stratégies de simulations mises en place sont multiples et quasiment propres à chaque cas d'étude. Par exemple, dans les cas d'étude où des scénarios de réduction des prélèvements sont simulés en faisant varier les volumes pompés par mois et par unité de gestion, il n'y a pas unicité de la répartition des prélèvements respectant le DOE ou le NOE. D'autres scénarios de prélèvements seraient donc tout aussi valables que celui retenu et pourraient conduire à une évaluation différente des volumes prélevables.

Cette limite est bien précisée par ANTEA dans son étude de la nappe des sables astiens.

Extrait du rapport ANTEA, 2013 (Nappe des Sables astiens) :

« La méthodologie étant basée sur la modification itérative des volumes prélevés sur chaque UG (Unité de Gestion), plusieurs scénarii acceptables peuvent être envisagés. Le scénario proposé n'en est donc qu'un parmi tant d'autres, la finalité étant de proposer un volume prélevable et un mode de gestion à partir des NOGL, qui pourront être revus après quelques années de mise en application. »

2.3.3. Limites associées aux modèles globaux

Conditions d'application non respectées

La méthode sera d'autant plus adaptée que l'aquifère est unique, exploité de manière homogène spatialement (Seguin, 2009). De la même manière, les modèles globaux seront difficilement exploitables lorsque la nature des échanges nappe-rivière varie d'amont en aval.

Nous reviendrons plus en détail sur les conditions d'application des modèles globaux dans le chapitre 4.

Du point de vue de l'estimation des volumes prélevables, la principale limite associée à la modélisation globale est liée au fait que la répartition géographique des prélèvements n'est pas prise en compte ; en effet, les prélèvements sont globalisés. Aussi, lorsque la répartition des captages n'est pas homogène sur le bassin modélisé, les résultats issus des modèles peuvent être entachés d'erreurs.

Cette limite, intrinsèque aux modèles globaux, n'est jamais discutée dans les rapports d'étude consultés.

Impact des prélèvements en nappe

Dans de nombreuses études par modélisation globale, les prélèvements dans la nappe superficielle sont traités comme des prélèvements directs dans le cours d'eau (sans atténuation ni effet retard ; Illustration 8). À l'inverse, les prélèvements plus profonds sont écartés de l'analyse car considérés comme non impactant la ressource en eau superficielle.

Cette hypothèse doit s'appuyer sur une analyse hydrogéologique et être discutée, ce qui n'est pas souvent le cas. Selon les contextes, cela aboutit à une évaluation optimiste ou au contraire pessimiste des volumes prélevables.

Par exemple, dans le cas des bassins crayeux de Champagne-Ardenne, l'évaluation est plutôt optimiste car la période d'irrigation intervient avant l'étiage :

Extrait du rapport BRGM, 2014 (bassins versants crayeux de Champagne-Ardenne) :

« Il convient également de rappeler que par suite de la mauvaise connaissance des données de prélèvement, en volume mais surtout en répartition temporelle, il n'a pas été possible de quantifier l'impact de ceux-ci sur les débits d'étiage. Il a ainsi été admis que les quantités prélevées se déduisaient directement (sans retard) sur les débits mesurés aux stations hydrométriques. Cela revient à considérer que les prélèvements s'effectuent à proximité du cours d'eau, vision optimiste de la situation avec un étiage survenant après la période d'irrigation. »

En tout état de cause, d'un point de vue technique, le caractère globalisant du modèle global rend délicat la prise en compte des prélèvements en nappe à l'échelle d'un bassin versant.

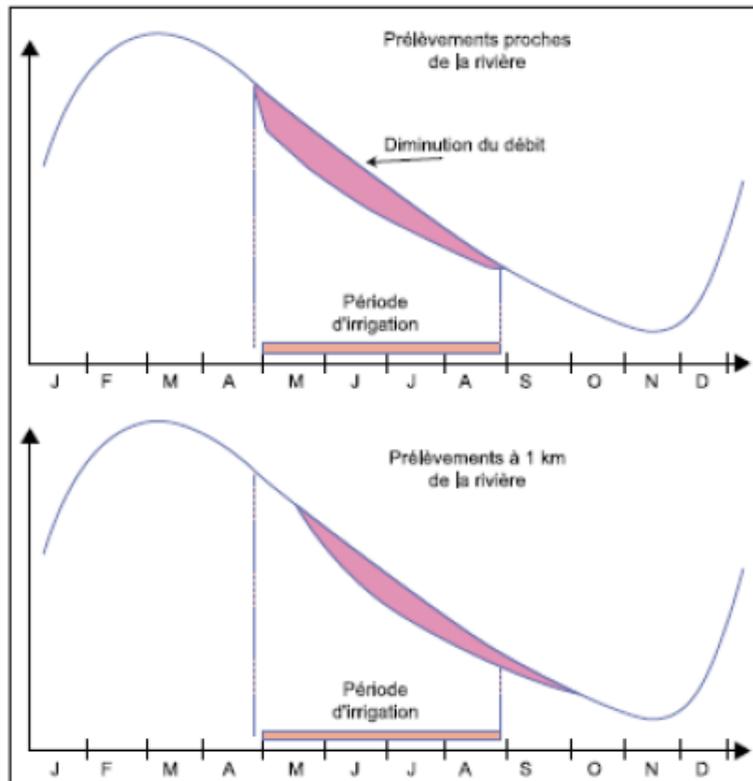


Illustration 8 : Impact des prélèvements pour irrigation en nappe de la craie sur le débit des rivières (extrait du rapport BRGM/RP-61371-FR)

Reconstitution d'un débit naturel

Ainsi, au regard de la difficulté des modèles globaux à retranscrire l'impact des prélèvements en nappe sur le débit des cours d'eau et de la méconnaissance de la répartition temporelle des prélèvements, la reconstitution du débit « naturel » d'une rivière par un modèle pluie-débit est associée à de nombreuses incertitudes, en particulier quand la ressource en eau souterraine est largement exploitée.

Pour certaines études, l'autre point méthodologique pouvant être remis en question dans cette approche est le fait de confronter un débit objectif résultant de mesures de terrain (DB, autres DOE calculés à partir d'enregistrements de terrain) à des débits simulés.

Dans les études de modélisation, il est, en effet, d'usage de comparer entre elles des données simulées lorsque l'on s'attache à calculer des ratios, des différences entre deux situations données, etc. Par exemple, l'impact du changement climatique sera appréhendé en comparant un état futur simulé et l'état actuel simulé (et non observé).

Transposition d'un calage pluie-débit à une unité de gestion non jaugée

Dans de nombreuses études, les paramètres de calage issus d'un modèle pluie-débit sur une station de jaugeage ont été transposés à des sous-bassins versants voisins et non jaugés sans qu'aucun argumentaire ne soit développé. Avec une répartition des prélèvements souvent différente d'un sous bassin à l'autre, cette transposition apparaît particulièrement incertaine pour reconstituer une chronique de débit dite « naturelle ». Les résultats d'une modélisation globale pluie-débit ne sont valables qu'en un seul point : la station hydrométrique.

Extrait du rapport CACG, 2009 (bassin de la Seudre) :

« Le modèle calé à Saint-André-de-Lidon est ensuite appliqué à l'ensemble du bassin versant situé en amont de Saujon pour générer une chronique journalière de débits naturels en ce point. »

Extrait du rapport SAFEGE, 2012 (plaine alluviale du Breuchin) :

« les données hydrométriques, utilisées comme bases pour le calage des modèles hydrologiques, voir pour la transposition de chroniques de débits à des points non jaugés, constitue une source d'incertitude sur les ajustements »

Extrait du rapport Artelia, 2012 (Drôme des collines) :

« En l'absence de données sur les autres bassins, à part les données de jaugeages de Sogreah et les valeurs de QMNA5 estimées par la DREAL, nous avons gardé les mêmes valeurs de calage que le bassin de l'Herbasse. Néanmoins, sur le Veau, nous avons estimé qu'il n'y avait pas de perte hors bassin (gros débits observés en tête de bassin). »

Délimitation des périmètres d'étude

Dans la plupart des études, les volumes prélevables sont associés à des unités de gestion préalablement définies (sous bassin versant topographique, bassins souterrains, issues d'analyses plus approfondies, etc.).

Or, lorsque les milieux superficiels et souterrains sont étudiés conjointement, il est rare que le périmètre d'étude (unité de gestion) soit délimité à partir des bassins versants souterrains. Un seul cas a été rencontré :

Extrait du rapport CACG, 2009 (bassin de la Seudre) :

Pour l'unité de gestion Seudre moyenne, « la limite amont n'est pas topographique, elle correspond à la crête piézométrique moyenne d'étiage entre les écoulements souterrains vers la Seudre en aval et ceux en direction des bords de Gironde. »

Il est indispensable de **prendre en compte les relations amont-aval entre les différentes unités hydrologiques**. En effet, la réduction des prélèvements sur des unités amont peut parfois suffire à rétablir un écoulement supérieur au débit de référence retenu plus à l'aval. L'évaluation des volumes prélevables sur des limites administratives apparaît donc particulièrement hasardeuse :

Extrait du rapport CETE, 2011 (Département de l'Allier) :

« Le travail a donc été réalisé à l'échelle du département et non des bassins hydrographiques, ce qui est une limite et une difficulté pour répondre de manière satisfaisante et cohérente d'un point de vue hydrologique à l'objectif demandé. En effet les sous bassins de la Sioule, de la Bouble, de l'Allier, de la Loire et de l'Acolin ne sont en réalité que des parties de bassins plus vastes, et leur fonctionnement dans le département de l'Allier est conditionné par la gestion de la ressource dans les départements voisins en aval et surtout en amont. »

2.3.4. Limites associées aux volumes prélevables estimés

Pour certaines études, les volumes prélevables calculés ne permettent pas toujours une gestion quantitative fine de la ressource en eau. Les principales limites identifiées sont énoncées ci-après :

- dans plusieurs cas, les volumes déterminés sont annuels et non ciblés sur la période d'étiage (Illustration 9). Cette globalisation est peu compréhensible, notamment pour les études où des modèles maillés au pas de temps mensuel ont été utilisés ;
- les résultats issus de nombreuses études regroupent indistinctement eaux superficielles et eaux souterraines ;
- les volumes prélevables sont déterminés dans la configuration actuelle des prélèvements (nombre de captages et localisation). Rares sont les études (avec modèles maillés) qui testent une nouvelle répartition des prélèvements. De telles simulations exploratoires permettent pourtant d'apporter un éclairage intéressant sur l'optimisation de l'exploitation de la ressource en eau (Cf. exemples, § 3.4.2) ;
- malgré les nombreuses incertitudes identifiées tout au long de la chaîne de calcul, les volumes prélevables sont rarement présentés par l'intermédiaire d'une fourchette de valeurs. Les contraintes réglementaires liées à l'estimation des volumes prélevables empêchent probablement une telle présentation des résultats.

Enfin, la circulaire du 30 juin 2008 précise que les volumes prélevables visent à « *satisfaire l'ensemble des usages en moyenne huit années sur dix, sans avoir besoin de recourir aux dispositions de la gestion de crise* ». Cela doit permettre de ne pas considérer les situations climatiques ou hydrologiques exceptionnelles.

Cette notion de fréquence n'est pas abordée de la même manière d'une étude à l'autre :

- fréquence non considérée : respect systématique du critère d'objectif ;
- étude basée sur une année de référence (particulièrement sèche ou concernée par des prélèvements importants) ;
- ajustement des séries de données à une loi de probabilité. Il faut ici signaler que dans certains cas, les chroniques de données ne présentent pas une durée suffisante pour mener une analyse statistique ;
- volume prélevable moyen calculé en excluant les n années (n=20% de la période étudiée) qui ont conduit aux volumes prélevables les plus faibles (ex. : Calligée, 2008 ; § 3.1.4) ;
- construction d'un scénario climatique alternant années moyennes et années quinquennales sèches. Deux cas de figure sont rencontrés :
 - utilisation des séries climatiques observées et identification d'années caractéristiques (année moyenne, période de retour 5 ans) (ex. : étude de l'Est lyonnais, Burgeap, 2010, § 3.3.5) ;
 - construction de séries climatiques à partir de lois statistiques (ex. : bassin versant de la Somme, BRGM, 2014 ; § 3.3.3).

Sur cet aspect des limites associées aux estimations, une très forte hétérogénéité des approches est donc aussi constatée. Or, l'implication dans l'estimation du volume prélevable ne sera bien entendu pas la même selon l'orientation choisie. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 4.

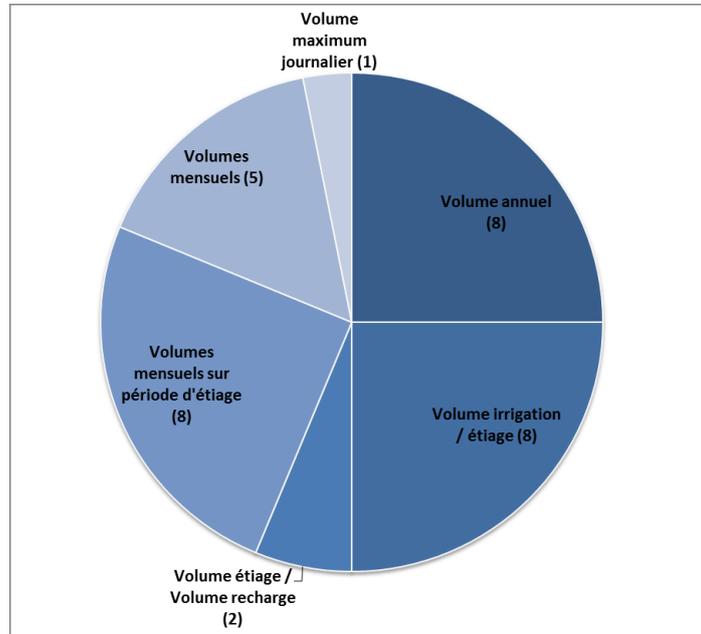


Illustration 9 : Volumes prélevables et périodes concernées

2.4. CONCLUSIONS

Quelle que soit la méthode mise en œuvre, les difficultés et les incertitudes liées à l'estimation des volumes prélevables impliquant des prélèvements en nappe libre sont ainsi nombreuses, ce qui témoigne de la difficulté du problème.

En premier lieu, une bonne connaissance de la dynamique des hydrosystèmes et des prélèvements devrait être un prérequis, rarement satisfait. En outre, les méthodes de calcul ainsi que les outils de modélisation qui visent à représenter, conceptualiser une réalité complexe présentent pour certains de ces outils des limites intrinsèques.

Il est, par conséquent, essentiel de garder à l'esprit que les volumes prélevables sont calculés au moyen d'approximations et d'hypothèses simplificatrices. Ils doivent de ce fait être considérés comme des ordres de grandeur, des valeurs guides à actualiser avec l'amélioration des connaissances et l'allongement des chroniques de mesures.

En conclusion de ce tour d'horizon, il s'avère qu'une méthodologie unique, aussi pertinente soit-elle, ne suffit pas à couvrir la variété des contextes hydrogéologiques et se heurte au problème récurrent des données insuffisantes pour obtenir des estimations fiables. Ces deux aspects, diversité des contextes d'une part, rareté des données d'autre part, contraignent à proposer des solutions alternatives, parfois peu satisfaisantes.

Dans le but d'appuyer au mieux les futures études, le chapitre 4 s'attachera à proposer plusieurs orientations méthodologiques et préconisations techniques, en se basant sur les expériences détaillées dans le chapitre 3.

3. Présentation de cas d'étude et de résultats

Pour montrer la forte hétérogénéité des approches rencontrées, le présent chapitre décrit plusieurs cas d'étude de façon sommaire. Ils ont été regroupés par type d'approche : sans mise en œuvre d'un modèle, avec modélisations globales et avec modélisation spatialisées.

La sélection des études s'est faite sur des critères méthodologiques dans le but de représenter au maximum la diversité des approches rencontrées. La fiabilité des résultats n'est pas discutée : comme vu précédemment, les résultats de ces études sont entachés de nombreuses incertitudes. Nous ne reviendrons pas systématiquement sur ces dernières, déjà largement abordées au chapitre 2.

D'un point de vue opérationnel, l'objectif est ici de proposer aux acteurs en charge des études EVP un choix de méthodologies, susceptibles d'être réutilisées et/ou adaptées.

3.1. SANS MISE EN ŒUVRE D'UN MODÈLE

Les trois premiers exemples traités sont basés sur une simple analyse des données historiques (pluviométrie, piézométrie, prélèvements, conductivité électrique de l'eau) pour des périodes/années de référence : à forte tension quantitative et/ou, au contraire, avec amélioration des états quantitatif et qualitatif des masses d'eau. Ces approches pragmatiques ont rarement été rencontrées mais présentent l'avantage de confronter les volumes prélevables estimés à la réalité du terrain.

Le quatrième exemple présenté correspond à une méthodologie développée par de Marsily et Combes (2008) en Vendée et adaptée aux nappes à cycles annuels.

Enfin, le dernier exemple, ne correspond pas à l'une des études EVP examinées, mais à des indicateurs élaborés par un groupe de travail piloté par la DREAL Haute-Normandie dans le contexte de la nappe de la craie drainée par le réseau hydrographique.

3.1.1. Nappe des alluvions du Gapeau : Grontmij et Rivages Environnement, 2014

Le fonctionnement de la nappe alluviale du Gapeau est présenté sur la base de la compilation, réinterprétation des données disponibles : pompages d'essai, carte piézométrique, modèle hydrodynamique élaboré par le Burgeap en 1992. Il en ressort notamment une forte hétérogénéité des échanges nappe-rivière dans l'espace et dans le temps.

La surexploitation chronique de la nappe conduit par ailleurs à une intrusion d'eaux salines.

À partir de l'analyse croisée des chroniques de précipitations, de prélèvements, de niveaux piézométriques et de conductivité électrique des eaux souterraines, un réseau de surveillance est proposé et des indicateurs sont définis pour la piézométrie et la conductivité (détermination *a priori* graphique ; Illustration 10). Pour ce faire, une attention particulière est portée aux années sèches.

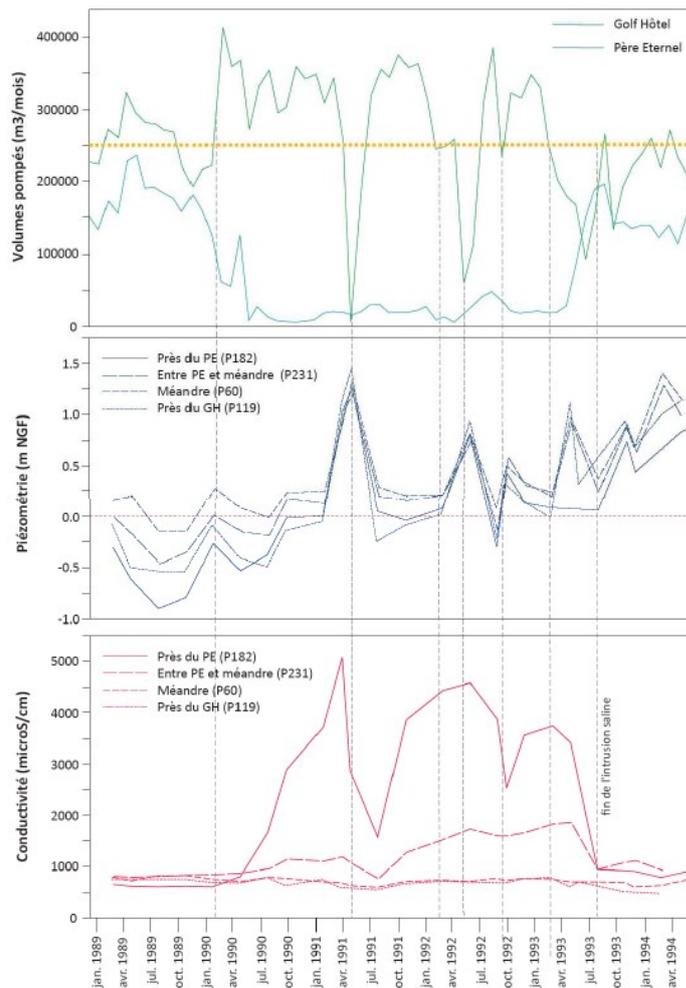


Illustration 10 : Historique des prélèvements, des niveaux piézométriques et de la conductivité des eaux souterraines sur la nappe alluviale du Gapeau (extrait de Grondmij, 2014)

Un volume maximum prélevable annuel est estimé pour la totalité de la masse d'eau et pour la partie aval concernée par les captages AEP d'Hyères sur la base de l'analyse historique des données pour différentes situations hydrologiques (Illustration 11). Pour le secteur aval, les résultats sont confrontés au stockage annuel de l'aquifère évalué par le modèle maillé (Burgeap, 1992) pour une pluviométrie moyenne (Illustration 11).

Pour la basse vallée, la démarche est ensuite reproduite avec l'analyse des chroniques de données aux pas de temps mensuel et journalier afin d'aboutir à l'estimation des volumes prélevables mensuels et journaliers. L'extrait de rapport ci-après illustre l'analyse historique menée au pas de temps mensuel :

« L'analyse des chroniques des volumes pompés mensuels sur la période 1989-2009 montre que l'aquifère est en équilibre quantitatif pour des productions mensuelles entre 300 000 et 400 000 m³/mois sur les captages d'Hyères, pour des années à pluviométrie excédentaire (1993-1997).

La stabilisation de l'état critique de 1989-1993 et le début du retour de la nappe à l'équilibre en 1994 a été favorisé par le maintien d'une production mensuelle à 280 000 m³.

Le retour de la nappe à l'équilibre en 2010 a été favorisé, lors d'années à pluie moyenne (2008-2010) à déficitaire 3 à 5 ans (2010-2012), par le maintien d'une production mensuelle de 220 000 à 360 000 m³.

On retiendra de l'expérience passée que le volume maximum prélevable mensuel permettant une exploitation durable, c'est-à-dire pendant des périodes de forte sécheresse, est de 280 000 m³. »

Méthode	Pluie annuelle	Volumes exploitables sur la partie aval de la masse d'eau (GH+PE)	Volumes exploitables sur la totalité de la masse d'eau
Analyse des chroniques d'exploitation sur la période 1989-1994	Déficitaire 5 ans à 10 ans	3,36 Mm ³ /an	-
Analyse des chroniques d'exploitation sur la période 1987-2011	Excédentaire (1996-1998)	3,50 Mm ³ /an <4,4 Mm ³ /an	4,6 - 5,5 Mm ³ /an
Analyse des chroniques d'exploitation sur la période 1987-2011	Déficitaire <5 ans (1998-1999)	<4,3 Mm ³ /an	<5,3 - 5,7 Mm ³ /an
Analyse des chroniques d'exploitation sur la période 1987-2011	Moyenne (2008-2010) à déficitaire 3 à 5 ans (2010-2012)	3,2 - 3,6 Mm ³ /an avec arrêt du Père Éternel	4,2 - 4,6 Mm ³ /an
modèle Burgeap 1994	Moyenne	3,30 Mm ³ /an	-

Illustration 11 : Tableau récapitulatif des volumes annuels exploitables pour la nappe alluviale du Gapeau (extrait de Grontmij, 2014)

Enfin, un débit instantané maximum prélevable a été évalué à partir de la loi de Darcy en définissant des rabattements et des rayons d'influence admissibles.

Grontmij préconise d'abandonner le champ captant du Père Éternel (moins productif) pour ne solliciter l'aquifère qu'au niveau des forages du Golf Hôtel, moins impactants du point de vue de l'intrusion saline.

Les volumes prélevables estimés ne permettant pas de répondre aux besoins AEP (7 Mm³/an), Grontmij souligne la nécessité de réaliser des prospections hydrogéologiques dans deux zones, d'ores et déjà identifiées, et d'interdire tout autre usage.

3.1.2. Nappe des alluvions de l'Argens : Grontmij et Rivages Environnement, 2013

L'Argens et l'aquifère alluvial connaissent un fonctionnement complexe : variations pluviométriques sur l'impluvium hydrogéologique, échanges entre le fleuve, la nappe alluviale et l'aquifère karstique du Trias moyen.

Pour les eaux souterraines, les volumes prélevables proposés s'appuient sur des situations passées de référence. Les critères ainsi retenus par le bureau d'études Grontmij sont les suivants :

« - abaisser les volumes maximum prélevables en deçà de ce qui a été produit les années sèches avant mai 2004 (et a fortiori durant les années 2004-2008), afin de rendre réversible plus rapidement une situation de type mai 2004 ;

- adopter les modes d'exploitation des années 2009-2010 qui ont favorisé la baisse drastique des chlorures des eaux souterraines et qui présentent des volumes produits inférieurs aux années 2000-2008. »

En parallèle, les débits de la nappe alluviale ont été approchés selon différentes méthodes : (1) à partir du volume pompé pendant un mois où la piézométrie et les teneurs en chlorures sont restés stables et où la pluie n'est pas significative, (2) débit instantané critique d'exploitation juste avant et juste après une augmentation de la concentration en chlorures (mai 2004) et une forte baisse de la piézométrie (juillet 2008), (3) selon l'application de la loi de Darcy et (4) par adaptation du modèle du Gapeau (bassin voisin aux nombreuses similitudes) :

« Dans la basse vallée de l'Argens, toutes les méthodes utilisées convergent vers un débit instantané d'exploitation maximum de la nappe alluviale, en basses eaux et en année sèche, de 200-220 l/s. »

En définitive, des volumes prélevables sont proposés pour quatre périodes distinctes : recharge (novembre à février), hautes eaux (mars à juin), moyennes eaux (juillet et août) et basses eaux (septembre et octobre) (Illustration 12). « Chaque période étant caractérisée par un volume global maximum et un volume mensuel maximum qui doivent permettre de maintenir l'aquifère en excédent quantitatif. »

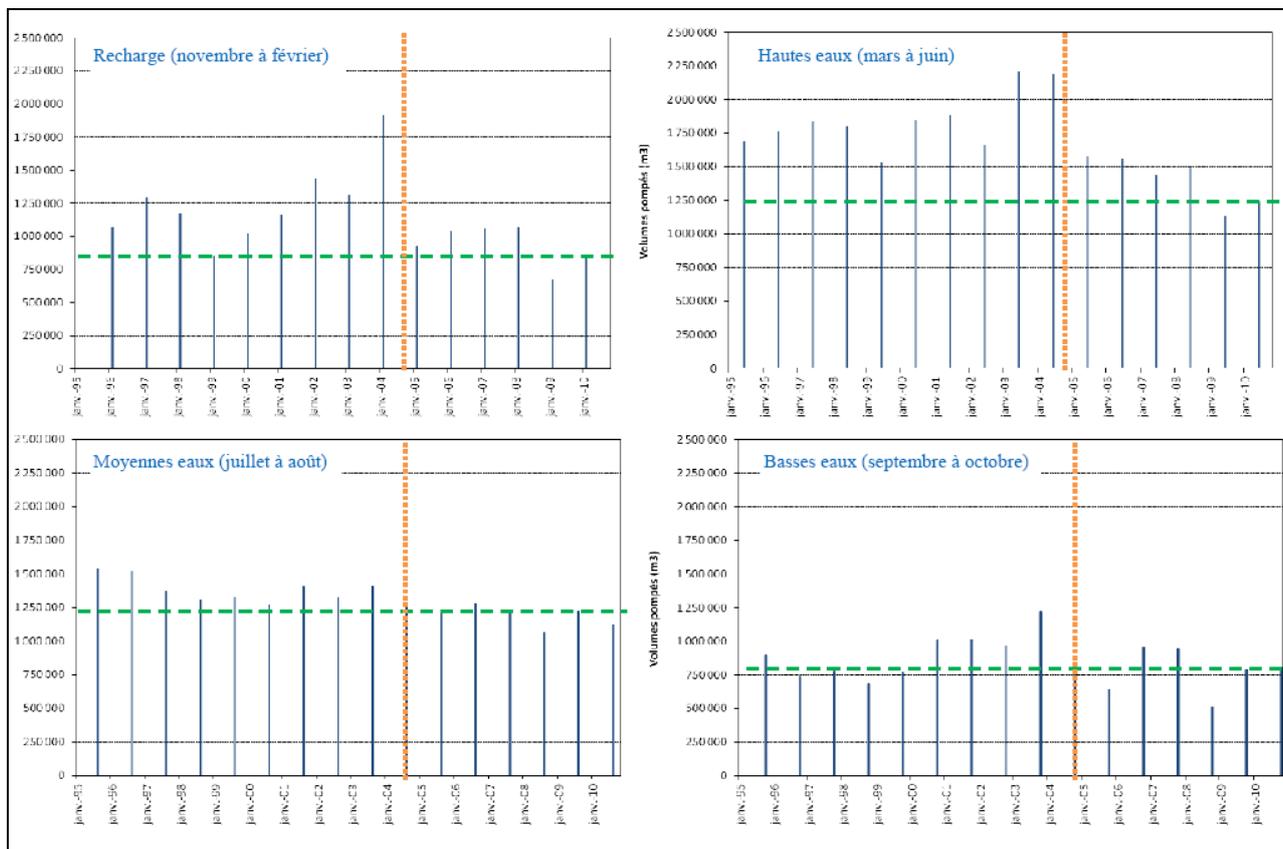


Illustration 12 – Évolution des prélèvements par période avec report du volume maximum prélevable et indication des événements d'alerte (trait orange) déterminés par l'évolution des concentrations en chlorure (extrait du rapport Grontmij, 2013)

Un débit maximum prélevable instantané de 200 l/s est également proposé sur la base de l'évaluation du débit de la nappe.

Par rapport à l'année 2010, aucune réduction des prélèvements n'apparaît nécessaire pour les eaux souterraines.

Pour les eaux superficielles, l'estimation des volumes prélevables a été réalisée selon la méthodologie préconisée par l'AERMC après détermination des débits biologiques et reconstitution des débits naturalisés. Des scénarios de réduction des prélèvements sont proposés, avec et sans prise en compte du changement climatique (projections à l'horizon 2030).

3.1.3. Entité hydrogéologique Mosson : BRGM, 2011

L'étude s'intéresse à la masse d'eau des calcaires karstifiés jurassiques du pli ouest de Montpellier et du Massif de la Gardiole. Cette masse d'eau est constituée au Nord par les calcaires jurassiques dits de la Mosson et au Sud par les calcaires de l'aquifère jurassique captif. L'aquifère karstique apparaît influencé par des eaux minéralisées d'origine profonde et des eaux plus superficielles (formations plio-quadernaires).

Dans un premier temps, les volumes prélevables ont été déterminés à partir de l'analyse des chroniques de données disponibles (piézométrie, conductivité électrique de l'eau, prélèvements, pluviométrie) dans le but « *d'approcher de façon globale et approximative ces volumes* ». L'extrait suivant donne un aperçu de l'analyse historique menée par le BRGM :

« Lorsque se succèdent des années avec des prélèvements inférieurs ou égaux à $3.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (2008-2010) la piézométrie d'étiage augmente et la conductivité électrique diminue progressivement.

Ainsi la valeur de $3.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ peut être retenue en première approche pour définir les volumes prélevables sur le compartiment Sud. Ce volume a été dépassé 5 fois et atteint à 3 reprises au cours des 10 dernières années. »

Cette première évaluation a finalement été confirmée par un modèle pluie-niveau en testant notamment différents scénarios climatiques et scénarios de prélèvements (Cf. § 3.2.2).

3.1.4. Sud Vendée : Calligée, 2008

La méthode mise en œuvre par Calligée pour les nappes du Sud Vendée est basée sur la démarche préconisée par G. de Marsily et P. Combes dans une note datée du 30 juin 2008 (non consultée). Cette approche nécessite une connaissance fine des prélèvements (débits bimensuels dans le cas présent) et est adaptée aux nappes à cycle annuel (faible inertie).

L'estimation des volumes prélevables se décompose selon les étapes suivantes :

1) Analyse des chroniques piézométriques et choix des années de référence :

On sélectionne dans les chroniques piézométriques les années où il n'y a pas (ou peu) d'influence des précipitations sur les niveaux à partir de la date t_0 jusqu'à une date t_1 .

En prenant comme exemple le piézomètre de Luçon captant la nappe du Dogger, cette sélection peut être facilitée par la construction d'un graphique tel que celui présenté par

l'Illustration 13 où, sur la période t_0-t_1 , on reporte les niveaux de chacune des années de la chronique, chaque niveau étant ramené à 0 à la date t_0 (ici au 1^{er} juin).

Le graphique montre qu'il est possible de retenir les années 2000, 2003, 2005, peu influencées par une recharge estivale, comme années de référence.

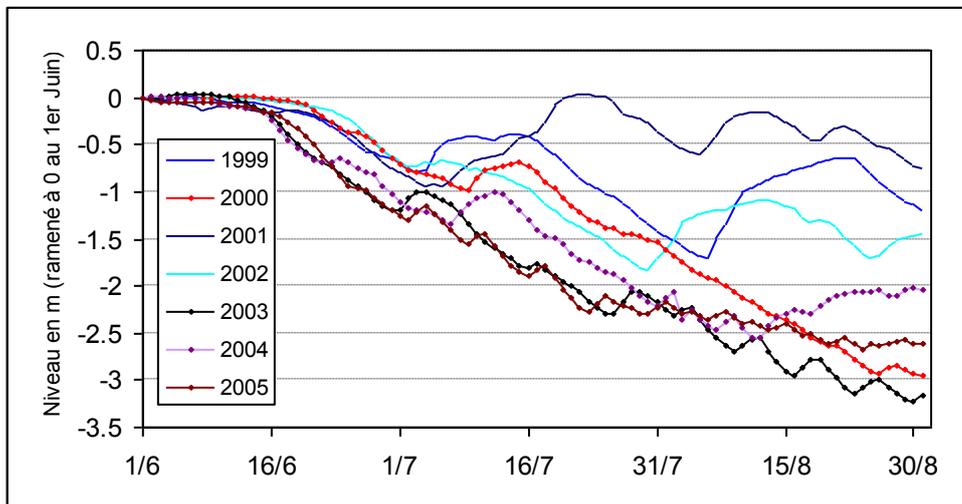


Illustration 13 - Niveaux année par année (ramenés à 0 au 1^{er} Juin) au piézomètre de Luçon (extrait du rapport Calligée N08-85138C)

2) Recherche d'une relation reliant niveaux piézométriques et volumes prélevés :

En reprenant l'exemple du piézomètre de Luçon, le graphique de l'Illustration 14 montre clairement que la relation linéaire postulée entre niveaux et volumes cumulé pompés est vérifiée pour chacune des années retenues.

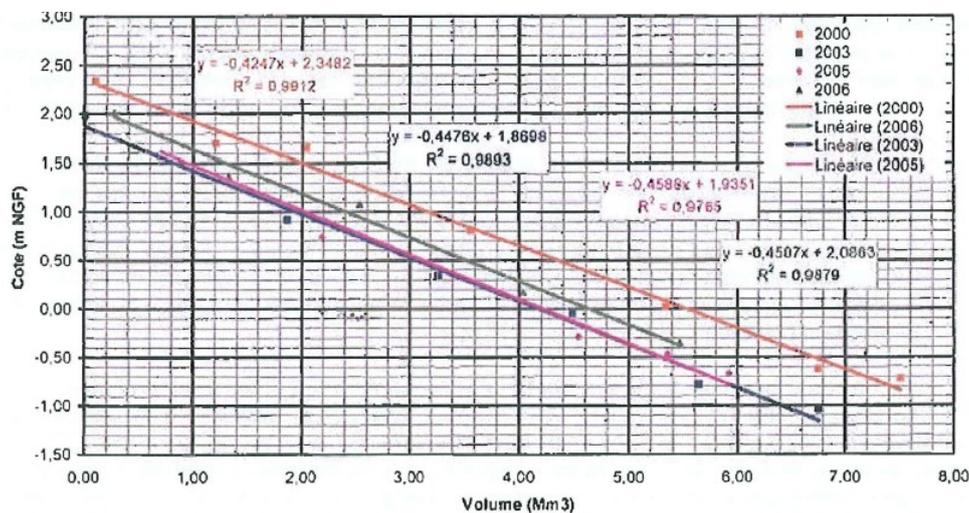


Illustration 14 - Mise en évidence d'une relation linéaire entre niveaux de la nappe et volumes pompés au piézomètre de Luçon en période estivale pour chacune des années retenues (extrait du rapport Calligée N08-85138C)

3) Calcul d'un volume spécifique :

Ces relations linéaires permettent d'obtenir un volume spécifique en période estivale (volume prélevé par mètre de rabattement de la nappe). Dans le cas du piézomètre de Luçon, il est

compris entre 2,2 et 2,3 Mm³ par mètre de rabattement (les pentes des droites sont presque identiques).

4) Extension aux autres piézomètres de référence :

La méthode doit être appliquée à plusieurs piézomètres pour que l'on puisse obtenir un volume spécifique moyen par secteur (Illustration 15).

Année	Secteur du Lay		Secteur de la Vendée		Secteur des Autises	
	Longeville	Luçon	Saint Aubin	Le Langon	Oulmes	Azire
2000	3,5	2,3	3,6	12,0	1,4	
2003	2,2	2,2	3,3	4,2	1,8	2,5
2005	2,2	2,2	3,3	3,4	1,3	2,8
2006	2,1	2,2	3,3	3,7	1,5	2,8
Valeur Moyenne retenue	2,2 Mm ³ /m		3,4 Mm ³ /m		1,4 Mm ³ /m	2,7 Mm ³ /m

Illustration 15 – Volumes spécifiques calculés à partir de plusieurs chroniques piézométriques du Sud Vendée (extrait du rapport Calligée N08-85138C)

5) Calcul des volumes prélevables pour respecter les piézométries objectifs :

En retenant sur un secteur donné un volume spécifique moyen V_{sp} (par exemple 2,2 Mm³ dans le secteur du Lay, Illustration 15), on peut calculer pour chaque année, à partir de la date t_0 , un volume exploitable permettant de respecter les seuils piézométriques préalablement fixés (inscrits au SDAGE).

Si H_0 est le niveau de la nappe à $t=t_0$ et si H_{obj} est le niveau à respecter, le volume exploitable sur une année i est : $V_{exp}^i = (H_0 - H_{obj}) \times V_{sp}$

On peut ainsi calculer le volume moyen exploitable, $\overline{V_{exp}}$, à partir des volumes annuels de chaque année de la chronique disponible (1986-2007). L'illustration 16 présente l'abaque ainsi construite par Calligée, qui permet d'estimer le volume estival exploitable en fonction d'une cote de la nappe que l'on s'interdit de franchir tous les ans (courbe épaisse) ou 4 années sur 5 (courbe fine). Pour cette dernière, les 4 années (sur les 22 disponibles) conduisant aux plus faibles volumes exploitables ont été écartées du calcul. Dans le cas de l'exemple, le niveau piézométrique objectif d'étiage étant de 0,5 m NGF, le volume estival exploitable est estimé à 4,15 Mm³/an (4 années sur 5).

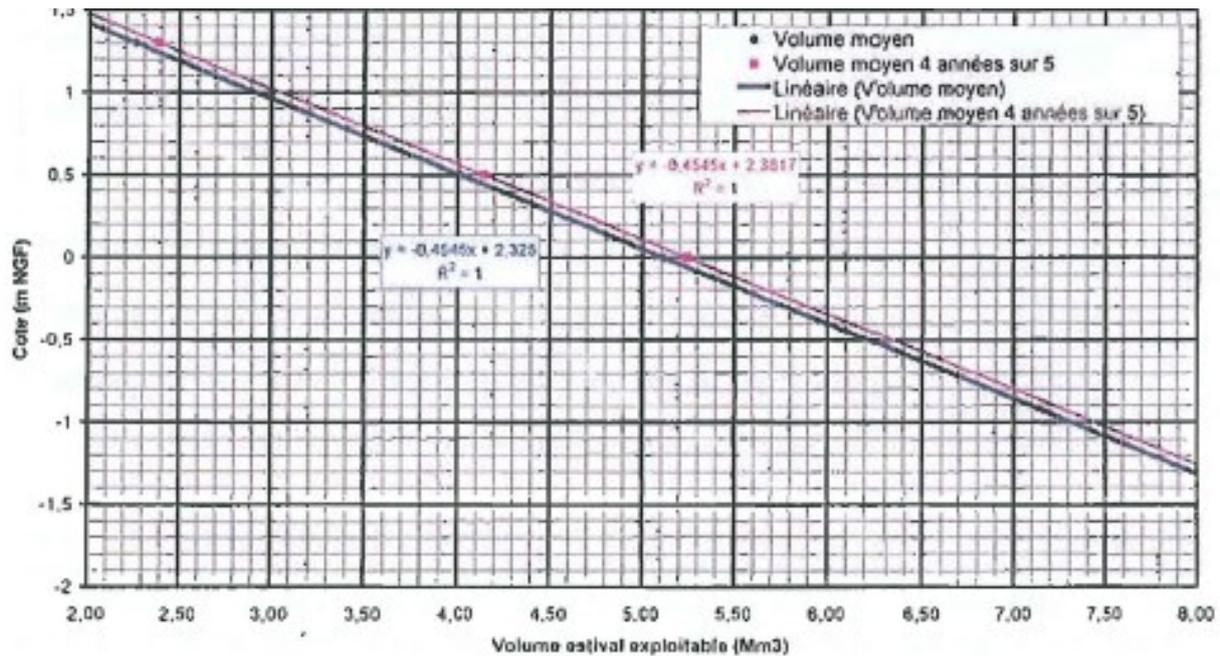


Illustration 16 – Relation entre le volume moyen exploitable en été et une cote donnée à respecter sur le secteur du Lay à partir des données du piézomètre de Luçon

3.1.5. Méthodes de calcul développées en Haute-Normandie : DREAL, 2010

Les cours d'eau haut-normands sont en grande partie alimentés par la nappe de la craie, en particulier en période d'étiage. Dans le but de maîtriser les prélèvements (cours d'eau, nappes d'accompagnement et nappe de la craie) et donc de préserver le bon état des eaux superficielles et des milieux aquatiques, un groupe de travail, piloté par la DREAL Haute-Normandie, a proposé des méthodes de calcul simples. Ces outils sont mis en œuvre lors de l'instruction de nouveaux prélèvements.

Trois indicateurs sont proposés pour estimer l'impact cumulé des prélèvements, dont les principes sont les suivants :

- Indicateur de Bon Etat Quantitatif des Eaux Souterraines : maintenir les prélèvements globaux en nappe inférieurs à 10 % (seuil fixé *a priori* de façon arbitraire) de la pluie efficace moyenne annuelle sur l'aire d'alimentation du captage (prise en compte des possibles autres captages sur l'aire d'alimentation) ;
- Indicateur d'Impact Direct sur les Eaux Superficielles : ne pas autoriser individuellement des prélèvements supérieurs à 5% du QMNA5 pour les pompages en rivière et en nappe alluviale. Cela aboutit au calcul d'un débit maximum instantané ;
- Indicateur de Bon Etat Quantitatif des Eaux Superficielles : ne pas autoriser des prélèvements dans un sous bassin versant supérieur à 10 % du QMNA5 influencé du cours d'eau à l'exutoire correspondant (Cf. Illustration 17).

Cet outil d'aide à la décision n'a pas directement été utilisé dans le cadre d'études EVP, mais les indicateurs proposés pourraient tout à fait être valorisés en contexte crayeux. La DREAL précise enfin qu'ils doivent en particulier permettre de limiter les déséquilibres quantitatifs localisés en tête de bassin versant et d'éviter des déficits structurels.

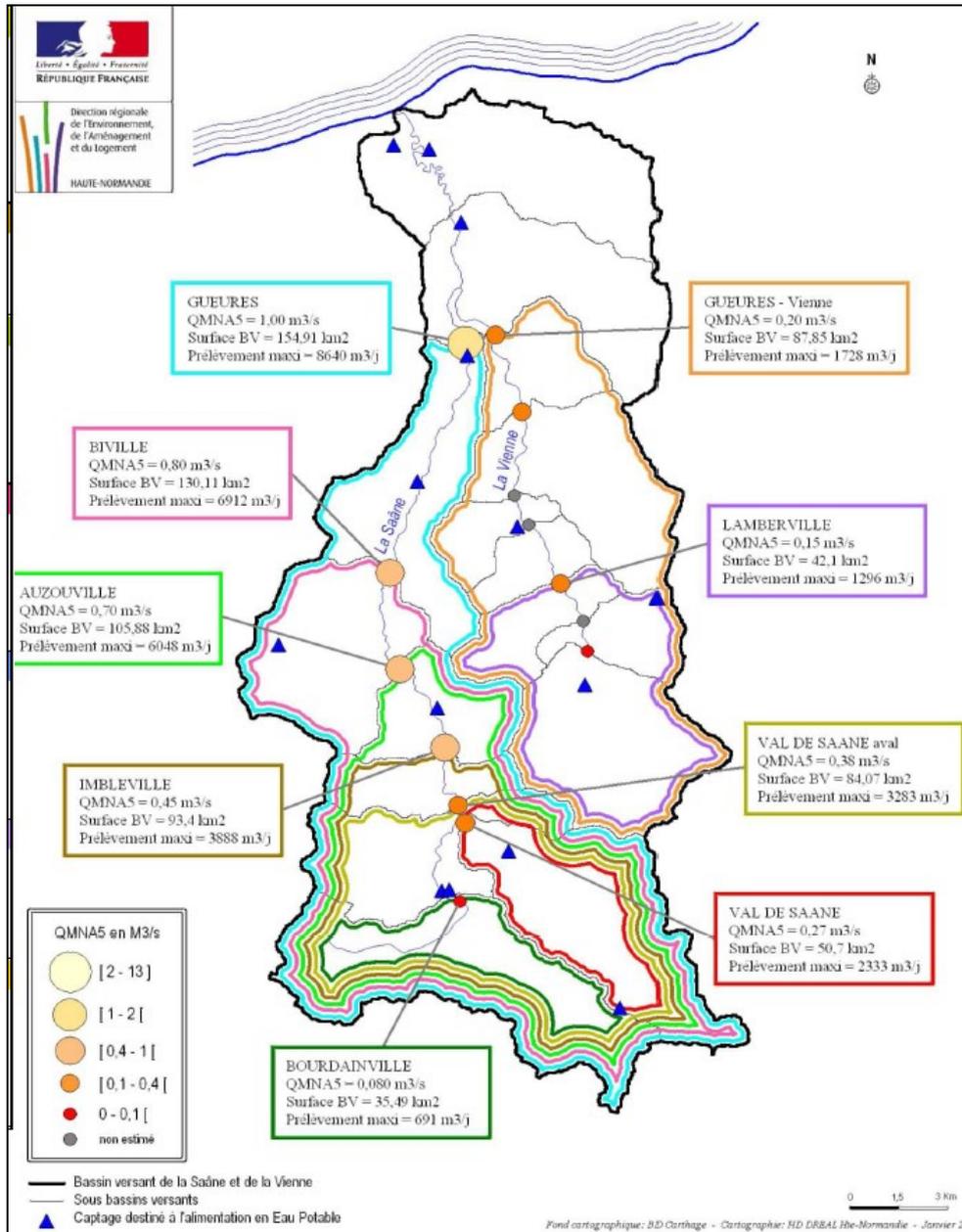


Illustration 17 : Calcul de l'indicateur du bon état quantitatif des eaux superficielles pour les bassins versants de la Saône et de la Vienne (volumes prélevables inférieurs à 10 % du QMNA5) (DREAL Haute-Normandie)

3.2. APPROCHES PAR MODÉLISATION GLOBALE

Les études ne différenciant pas eaux superficielles et eaux souterraines (modèle pluie-débit), déjà présentées précédemment (§ 2.2.1), ne sont pas reprises dans le présent paragraphe. Les études ici sélectionnées proposent des approches plus approfondies et qui prennent en compte le réservoir souterrain :

- modélisation semi-globale à deux réservoirs pluie-débit avec intégration d'une solution analytique pour caractériser l'impact des prélèvements en nappe sur le débit du cours d'eau (Artelia, 2012) ;
- modélisation de type boîte noire Pluie-Niveau avec reconstitution des niveaux non influencés à partir d'un calage sur la chronique de suivi antérieure au lancement des prélèvements (BRGM, 2011) ;
- modélisation globale à trois réservoirs Pluie-Débit-Niveau (BRGM, 2014a).

Enfin, la méthodologie préconisée par le CRESEB (2015) pour les bassins versants bretons est rapportée.

3.2.1. Drôme des collines : Artelia, 2012a

La démarche proposée par Artelia pour les bassins de la Drôme des collines, de la Galaure et de la Véore va plus loin qu'une simple modélisation pluie-débit.

D'un point de vue hydrogéologique, le bassin de la Drôme est concerné par l'aquifère de la molasse Miocène, affleurant sur les parties amont et médiane des bassins versants et recouvert par les alluvions de l'Isère et du Rhône en fond de vallées. Les relations entre la nappe de la Molasse et les rivières sont complexes avec des échanges possibles dans les deux sens selon la saison et les secteurs.

Un modèle semi-distribué a été mis en œuvre (découpage par sous-bassin versant et par tronçon de 1 km de rivière). La variabilité spatiale des précipitations et des prélèvements est ainsi prise en compte.

Les prélèvements en nappe (alluvion + aquifère molassique sous-jacent) sont ensuite distingués des prélèvements en rivière et leur impact sur le débit du cours d'eau est approché par l'intermédiaire d'une solution analytique. Le schéma de principe du modèle à 2 réservoirs utilisé est présenté par l'illustration 18 (logiciel non précisé). Des échanges entre le réservoir rivière et le réservoir nappe sont possibles dans les deux sens.

La modélisation a été conduite au pas de temps journalier sur la période 2002-2010 (prélèvements non connus antérieurement).

La solution analytique retenue est celle établie par Forkasiewicz et Peaudecerf en 1976 (Cf. exemple de résultat, illustration 19). Chaque forage est étudié au cas par cas et l'impact sur la rivière est ensuite intégré au modèle global pluie-débit.

L'application de la solution analytique passe par plusieurs hypothèses simplificatrices, clairement énoncées par Artelia :

« Nous avons retenu comme formulation générale l'hypothèse d'une rivière droite avec un contact parfait avec la nappe⁶, et une nappe semi-infinie. Dans la réalité, même si nous savons que l'aquifère molassique est tout sauf homogène, nous avons travaillé en supposant un aquifère homogène, de transmissivité moyenne $T=2,53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et de coefficient d'emmagasinement moyen $S=1,9 \cdot 10^{-2}$.

Les hypothèses sont simplificatrices et l'impact des prélèvements les uns sur les autres n'est bien évidemment pas pris en compte, mais cette formulation permet quand même de prendre en compte de manière différente et sans doute assez raisonnable les différences entre les prélèvements en rivière et les prélèvements en nappe ».

En complément, il aurait pu être intéressant de tester d'autres solutions analytiques et de comparer les résultats obtenus avec la solution analytique à ceux obtenus par la modélisation semi-globale en considérant les prélèvements en nappe équivalents à des prélèvements directs dans la rivière.

L'estimation des volumes prélevables a été effectuée de la manière suivante :

- ✓ simulations des débits avec et sans prélèvement sur 2002-2009 ;
- ✓ calcul des débits statistiques pour les différents cours d'eau (QMNA5, VCN3, VCN10, 10% du module) en conditions influencées et désinfluencées ;
- ✓ identification de points de référence sur les cours d'eau et calcul des débits caractéristiques d'étiage (en conditions influencées et désinfluencées) ;
- ✓ détermination des débits biologiques. Il n'a pas été possible de s'appuyer sur ces derniers, très régulièrement dépassés en étiage, pour estimer les volumes prélevables ;
- ✓ calcul de nouveaux débits objectifs d'étiage aux stations micro-habitat à partir de la simulation de scénarios de réduction des prélèvements (20, 40, 60 et 80% de réduction appliqués de manière uniforme sur toute l'année). Le débit objectif est déterminé à partir de l'analyse de la perte d'habitat naturel (dégradation maximale de 20% par rapport à la situation naturelle reconstituée, IRSTEA, 2008) ;
- ✓ extrapolation des nouveaux DOE aux points de référence, différents des stations micro-habitat (approche dite exploratoire par Artelia, « elle ne saurait remplacer une analyse micro-habitat à l'endroit d'intérêt ») ;
- ✓ une réduction globale des prélèvements est finalement proposée par sous bassin versant (entre -20 et -45 %), elle correspond au scénario permettant de respecter une dégradation maximale de l'habitat de 20 %. Le scénario retenu est associé à un volume prélevable moyen mensuel de juin à septembre.

⁶ berge verticale non colmatée et traversant complètement la nappe

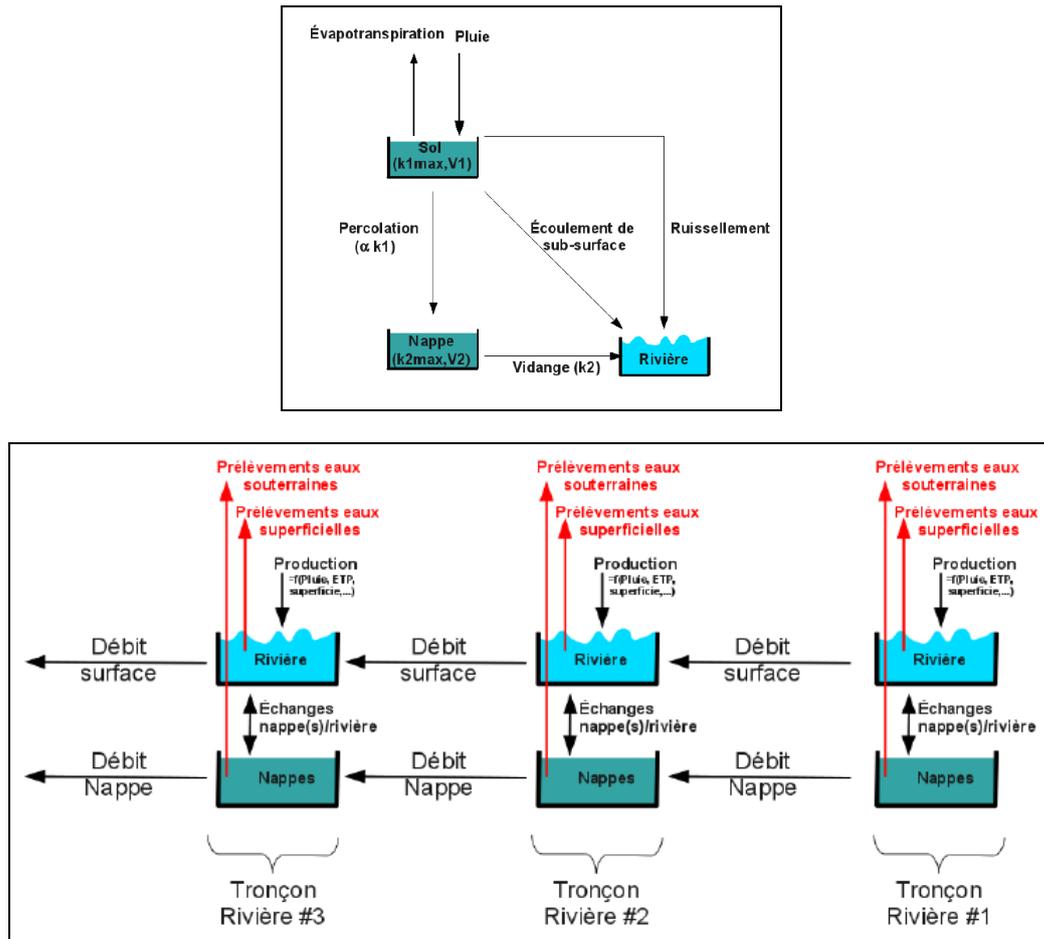


Illustration 18 – Schémas de principe du modèle semi-distribué à 2 réservoirs utilisé pour l'étude de la Drôme des collines (Artelia, 2012a) : principe général (en haut) et fonctionnement par tronçon de rivière (en bas)

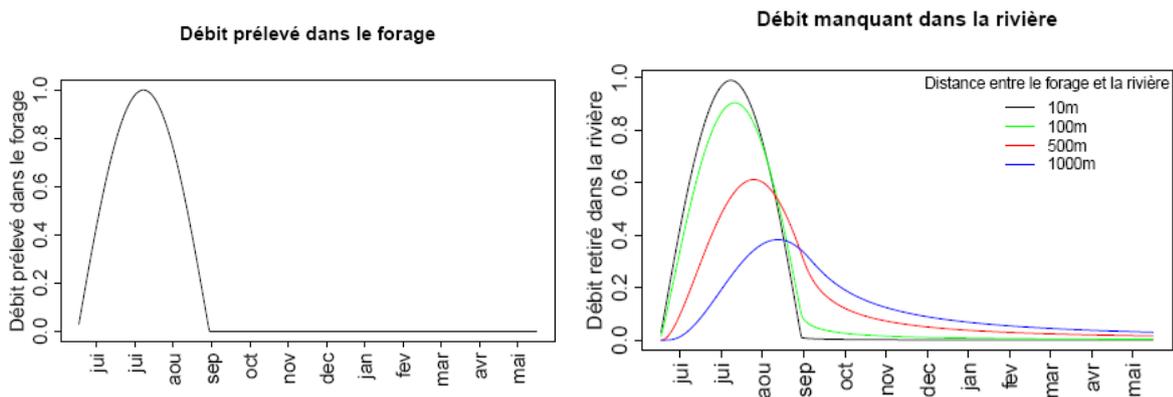


Illustration 19 : Exemple de l'impact d'un prélèvement sur le débit de la rivière selon Forkasiewicz et Peaudecarf, 1976 (extrait du rapport Artelia, 2012a – Drôme des collines)

3.2.2. Entité karstique Mosson : BRGM, 2011

Faute données suffisantes, le compartiment Nord de l'entité hydrogéologique n'a pas pu être étudié.

Pour le compartiment Sud, l'estimation des volumes prélevables par modélisation globale au pas de temps journalier (modèle de type boîte noire TEMPO développé par le BRGM) a suivi la démarche suivante :

- ✓ reconstitution des niveaux piézométriques non influencés par les prélèvements sur la période 1974-2010 à partir d'un calage du modèle sur la période 1978-1980 où l'exploitation de la nappe était faible voire négligeable. Le modèle a été validé sur les deux années antérieures (1976-1977). La durée de la période de calage est particulièrement courte, mais cette approche présente l'avantage de s'affranchir de la prise en compte des prélèvements pour reconstituer les niveaux naturels. La différence entre les niveaux non influencés modélisés et les niveaux observés apparaît nettement à partir de 1985 pour s'accroître et atteindre 1 m au début des années 2000 (impact des pompages) ;
- ✓ modélisation des niveaux piézométriques avec prise en compte des prélèvements en avril de chaque année (à partir des chroniques annuelles de prélèvements). Faute de données antérieures sur les prélèvements, la modélisation débute en 2001 ;
- ✓ calcul du bilan hydrogéologique à partir de l'évaluation des prélèvements, des débits de la source d'Avy et de la recharge calculée par le modèle (modèle pluie-débit). Compte tenu des approximations faites, une incertitude de l'ordre de 20 % sur le bilan est avancée par le BRGM. Le bilan met en évidence un déficit moyen de l'ordre de 1 Mm³/an sur les 10 dernières années pour le compartiment Sud ;
- ✓ définition des NPA (Niveaux Piézométriques d'Alerte) et des NPCR (Niveaux Piézométriques de Crise) à partir de l'analyse croisée des chroniques piézométriques et de conductivité électrique de l'eau ainsi que des résultats de la modélisation ;
- ✓ conception de scénarios climatiques à partir d'une analyse statistique des précipitations des 40 dernières années (scénarios décennal sec, quinquennal sec, médian, quinquennal humide et décennal humide) : des années de référence sont déduites du cumul des précipitations annuelles associé aux différents quantiles : ex. 2005 pour décennal sec, 1981 pour quinquennal sec, etc. ;
- ✓ identification des niveaux piézométriques d'étiage à partir du modèle sans prélèvements. Quel que soit le scénario climatique simulé, le niveau d'étiage varie peu : entre 1,8 m NGF pour le scénario décennal sec et 2,0 m NGF pour le décennal humide. Pour la suite, le BRGM fait ainsi l'hypothèse que les variations piézométriques induites par les précipitations sont de 20 cm (d'où une incertitude de +/- 10 cm) ;
- ✓ utilisation du modèle avec prélèvements en mode prévision pour différents volumes prélevés (de 0 à 4 Mm³/an par pas de 0,5 Mm³/an) et différents scénarios climatiques. Les simulations révèlent que pour des prélèvements supérieurs à 3 Mm³/an, le NPA est atteint quel que soit le scénario climatique (Illustration 20).

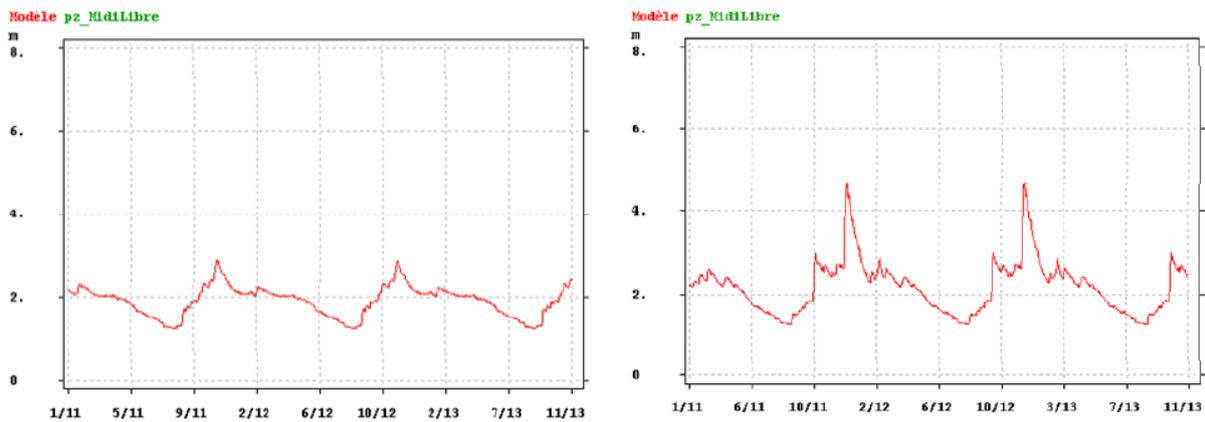


Illustration 20 – Piézométrie simulée pour des prélèvements de 3 Mm³/an pour un scénario climatique décennal sec (à gauche) et un décennal humide (à droite) (BRGM, 2011). Le niveau piézométrique d'alerte (NPA) a été fixé à 1,2 m NGF

3.2.3. Bassins versants crayeux de Champagne : BRGM, 2014b

Dans un premier temps, les analyses se sont portées sur les indicateurs piézométriques potentiels des différentes masses d'eau. Ces analyses ont permis de montrer l'existence de relations directes entre les débits au droit des stations hydrométriques et les niveaux d'eau observés aux différents piézomètres existants (Illustration 21). La relation à utiliser dépendra du niveau de remplissage de l'aquifère à l'issue de la période de recharge et variera donc d'une année à l'autre.

Sont ainsi évalués les niveaux piézométriques garantissant les différents seuils utilisés sur les cours d'eau (alerte, crise et crise renforcée).

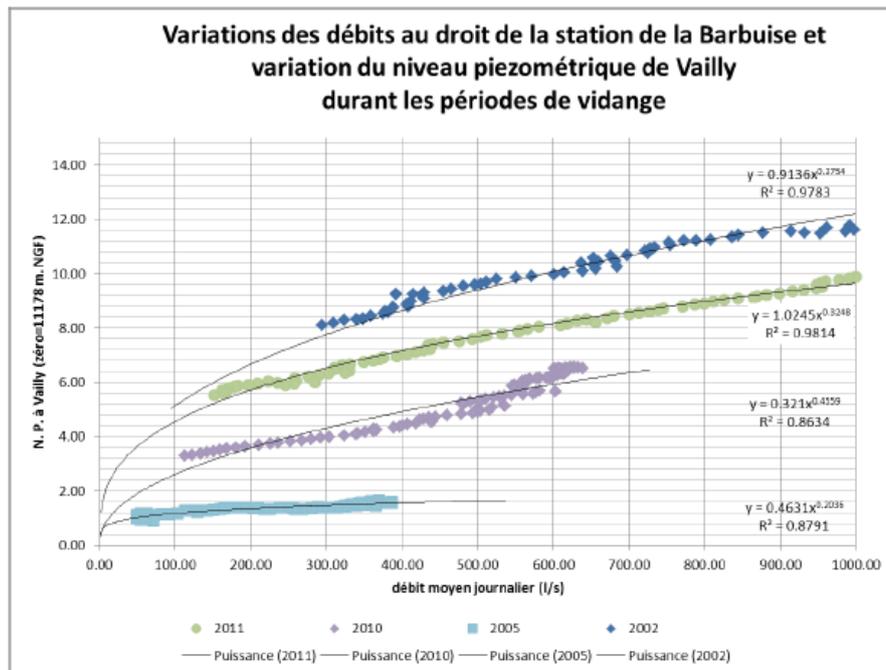


Illustration 21 – Relation entre débits moyen journalier de la Barbuise et niveaux piézométriques à Vailly en période de vidange de l'aquifère pour différentes années (Rapport BRGM/RP-61371-FR)

Des modélisations globales pluie-débit-niveau ont été menées sur 18 bassins versants jaugés, au pas de temps décadaire. Ces doubles modélisations présentent l'avantage simultanément d'équilibrer les bilans et de conforter le calage. Les modèles ont été calés sur la période où les prélèvements sont connus (1994-2011 en général) et validés sur une période antérieure (1980-1993).

Pour chaque bassin, les débits naturels simulés ont été utilisés pour effectuer des ajustements statistiques suivant une loi racine Gauss afin d'estimer : le QMNA5 « naturel », le cumul des débits décadaires simulés supérieurs au QMNA5 « naturel » pour les périodes de mai à septembre et de juin à août.

Pour chaque année modélisée, le cumul des débits est traduit en un volume « potentiellement disponible » en période d'étiage. Les volumes prélevables sont finalement proposés pour deux périodes distinctes (mai à septembre et juin à août) et correspondent au volume « potentiellement disponible » de période de retour 5 ans (respect des objectifs 8 années sur 10).

Une fois les modèles calés et validés, ils ont également été utilisés en mode prévision avec comme date de départ début octobre (basses eaux et pompages agricoles arrêtés) et selon deux états initiaux : débit et niveau piézométrique de fin septembre 2011 (année sèche à moyenne) et de fin septembre 2001 (année humide) (Illustration 22). Une prévision sans aucune précipitation est également réalisée pour fournir les débits correspondant à la « prévision garantie ».

Pour chaque bassin versant modélisé et pour chaque condition initiale, il a été calculé de mai à septembre le volume cumulé total prévisionnel de probabilité 20 % (satisfait 8 années sur 10), les volumes cumulés prévisionnels de probabilité 20 % dépassant le débit de seuil d'alerte existant, le QMNA5 de la banque HYDRO et le QMNA5 « naturel » simulé sur la période 1980-2011.

Concernant cette étude, la principale limite mise en avant est liée à la mauvaise connaissance des données de prélèvements, en volume mais surtout en répartition temporelle. **Il n'a pas été possible de quantifier l'impact de ceux-ci sur les débits d'étiage. Il a ainsi été admis que les quantités prélevées se déduisaient directement (sans retard) sur les débits mesurés aux stations hydrométriques.** Cela revient à considérer que les prélèvements s'effectuent à proximité du cours d'eau, vision optimiste de la situation avec un étiage survenant après la période d'irrigation.

Les volumes prélevables sont à actualiser en fonction de la situation hydrologique à fin septembre, car l'étude a montré pour les bassins versants crayeux de Champagne que les débits de l'année précédente influencent directement les volumes prélevables de l'année suivante.

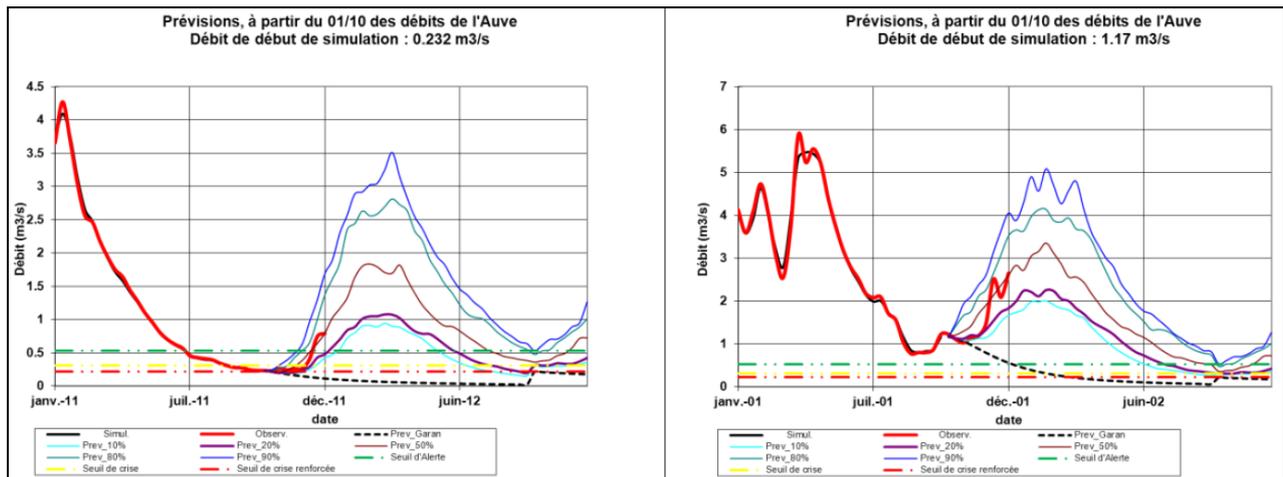


Illustration 22 – Simulations prévisionnelles et évaluation des volumes disponibles en fonction de différents critères (débit d'alerte, QMNA5) pour l'Auve (Rapport BRGM/RP-61371-FR)

3.2.4. Bassins versants bretons : méthodologie CRESEB, 2015

Sous la coordination du CRESEB (Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau de Bretagne), un groupe technique (IRSTEA, CNRS, INRA, Université Rennes 2, BRGM) a été constitué afin d'élaborer un guide méthodologique visant à la gestion équilibrée de la ressource en eau des bassins versants hydrographiques bretons.

Nous nous intéressons ici au volet relatif à l'identification des déséquilibres quantitatifs et à la méthodologie préconisée par le groupe technique. Cette dernière se décline en trois étapes :

- Étape 1 : étudier la ressource en eau disponible.
 - o phase 1.1 : analyse comparée des précipitations et de l'ETP annuelles et des volumes écoulés en cours d'eau (module, débits caractéristiques de l'étiage : QMNA, VCN10,...) ;
 - o phase 1.2 : détermination de la contribution de l'aquifère à l'écoulement du cours d'eau en période d'étiage par l'étude de la décroissance du débit en fonction du nombre de jours sans pluie (P-ETP=0). Cette analyse permet d'aboutir à l'estimation du temps de vidange d'un bassin versant (loi exponentielle), directement associé aux caractéristiques physiques et hydrodynamiques des formations géologiques sous-jacentes. Pour ce faire, il est recommandé de disposer d'au minimum 10 périodes d'étiage ;
 - o phase 1.3 : modélisation du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin versant via un modèle global à réservoirs pluie-débit au pas de temps mensuel. Le guide est illustré avec le modèle GR2M développé par l'IRSTEA.
- Étape 2 : caractériser les prélèvements en lien avec les usages des ressources.
- Étape 3 : caractériser l'équilibre ressources / usages et examiner l'évolution possible du système hydrologique.
 - o phase 3.1 : analyse comparée des prélèvements nets et des précipitations, de l'ETP et des débits des cours d'eau (indicateurs usuels : QMNA5, 1/10 du module, ...), à l'échelle annuelle ;

- phase 3.2 : modélisation au pas de temps mensuel de l'impact des pressions anthropiques actuelles. Les prélèvements et rejets en rivière impactent directement le débit du cours d'eau. Pour les volumes pompés en nappe, l'impact est différé, avec une extraction qui se fait au niveau du réservoir de routage R de GR2M (Illustration 23) ;
- phase 3.3 : intégration des scénarios de gestion (intégrant les prélèvements futurs sur les ressources en eau) et de climat (projections climatiques issues du GIEC).

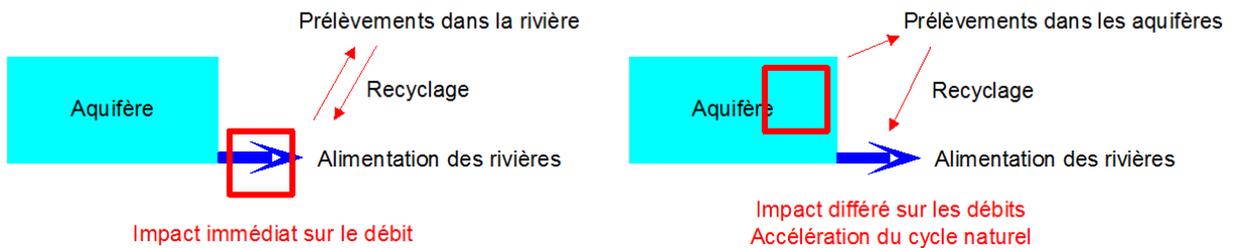
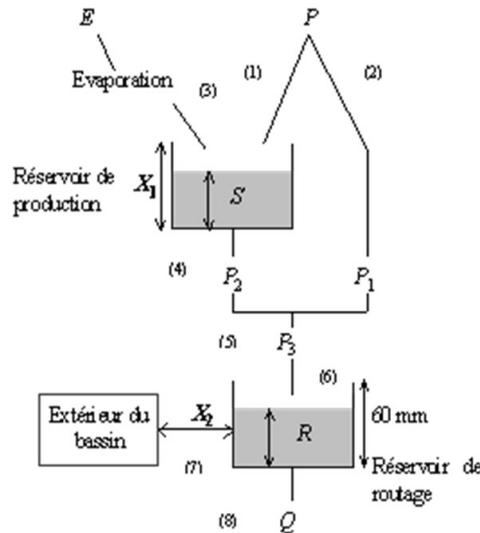


Illustration 23 – Modèle pluie-débit GR2M de l'IRSTEA et prise en compte des prélèvements (CRESEB, 2015)

3.3. APPROCHES PAR MODÉLISATION SPATIALISÉE

La présente étude n'a pas pour objet d'expertiser les modèles utilisés, ces derniers n'étant de toute façon que rarement décrits dans les rapports consultés. L'objectif est ici de présenter différentes stratégies de simulation mises en œuvre pour aboutir à la détermination des volumes prélevables, dans différents contextes hydrogéologiques.

Ne sont présentées dans ce paragraphe que les études où les volumes prélevables sont directement issus des différents scénarios simulés par le modèle. Ce n'est pas le cas des études de la plaine alluviale du Breuchin et des bassins de la Véore Barberolle, du Lez et de l'Aygues. Pour ces quatre exemples, les modèles maillés sont en effet exploités pour améliorer la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème, reconstituer une piézométrie non influencée mais pas directement pour évaluer les volumes prélevables.

Pour chaque exemple, préalablement à la stratégie de simulations, le contexte hydrogéologique et une description du modèle sont présentés. Le niveau de précision relatif à ces éléments de contexte dépend des informations contenues dans les rapports d'étude. Il est rappelé que la totalité des études consultées est listée au niveau de l'Annexe 1 (avec renvois vers les paragraphes du rapport concernés)

3.3.1. Nappe des sables astiens : ANTEA, 2013

Contexte hydrogéologique

La nappe des sables astiens, située sur le littoral méditerranéen, s'étend sur environ 450 km² entre Mèze et Béziers. Elle est très fortement exploitée pour l'AEP depuis plusieurs décennies.

Les sables affleurent au nord et s'enfoncent en direction du sud sous des terrains à dominante argileuse (profondeur de 120 m en bordure littorale). L'aquifère a une épaisseur comprise entre 20 et 30 m. La nappe est captive et parfois artésienne sur le littoral. Cependant, la piézométrie en bordure du littoral est proche du niveau de la mer et toute surexploitation peut avoir comme conséquence une progression du biseau salé. Le fonctionnement de l'hydrosystème peut se résumer ainsi :

- infiltration au niveau des zones d'affleurement (17 km²) ;
- échanges avec les alluvions récentes (nappes alluviales du Libron, de la Thongue et de l'Hérault) ;
- drainance descendante sur une partie nord de l'aquifère ;
- échanges latéraux avec les aquifères de bordure (Molasse du Miocène, formations du Crétacé et formations karstifiées du Jurassique supérieur) ;
- échanges de l'aquifère avec l'étang de Thau et la mer mal connus.

Description du modèle hydrodynamique

Logiciel : Talisman (HydroExpert)

Il s'agit d'un modèle dans lequel les épontes ne sont pas physiquement intégrées au modèle géologique. Les simulations sont faites au pas de temps mensuel. Aucune information n'a été recueillie concernant la géométrie de l'hydrosystème modélisé, la gestion des échanges nappes-rivières ou encore des conditions hydrauliques affectées aux limites.

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ délimitation de 9 unités de gestion à partir d'une analyse cartographique multi-critères (répartition des prélèvements, rabattement maximal observé, baisse interannuelle du niveau piézométrique, risques d'intrusion saline, recharge). Cette première analyse technique a été croisée aux impératifs de la gestion administrative (découpage gestionnaires AEP, limites administratives, etc.) ;
- ✓ identification d'un piézomètre de référence pour chaque unité de gestion (ouvrages existants, représentatif du comportement de l'UG, non exploités, non influencés par les prélèvements des UG voisines, en bon état, etc.). Pour cibler les piézomètres non influencés par les UG voisines, le modèle a été exploité ;
- ✓ définition des niveaux piézométriques de référence mensuels selon des critères validés en Comité de Pilotage (analyse des données de pluie, ETP et pluie efficace afin d'identifier les années singulières + analyse statistique des niveaux piézométriques) ;
- ✓ simulation de l'année 2009, particulièrement sèche, au pas de temps mensuel, dans le but d'appréhender l'impact des prélèvements. Un ajustement de la délimitation des unités de gestion a été réalisé sur la base des rabattements simulés ;
- ✓ simulation, au pas de temps mensuel, de différents scénarios de réduction des prélèvements sur l'année 2009 (prélèvements 2009 = scénario « 100% »). Les scénarios sont déclinés en modulant par mois et par unité de gestion le volume prélevé pour approcher les niveaux piézométriques d'objectif : d'abord de façon systématique (pourcentage de baisse appliqué de façon homogène sur les unités de gestion et les différents usages) puis en affectant un pourcentage différent selon les unités de gestion et selon les mois de l'année ;
- ✓ correction des niveaux piézométriques mensuels 2009 simulés (prise en compte de l'écart avec les niveaux observés) avant comparaison avec les niveaux de référence. Une marge d'incertitude de 15 cm est acceptée entre le niveau simulé et le niveau de référence ;
- ✓ proposition de volumes prélevables mensuels par unité de gestion. Le scénario final retenu correspond à une baisse globale de 90 % du volume prélevé en 2009, avec des baisses variables selon les UG et selon les mois. Les VP ont été comparés aux prélèvements des années 2009 à 2012 (Illustration 24).

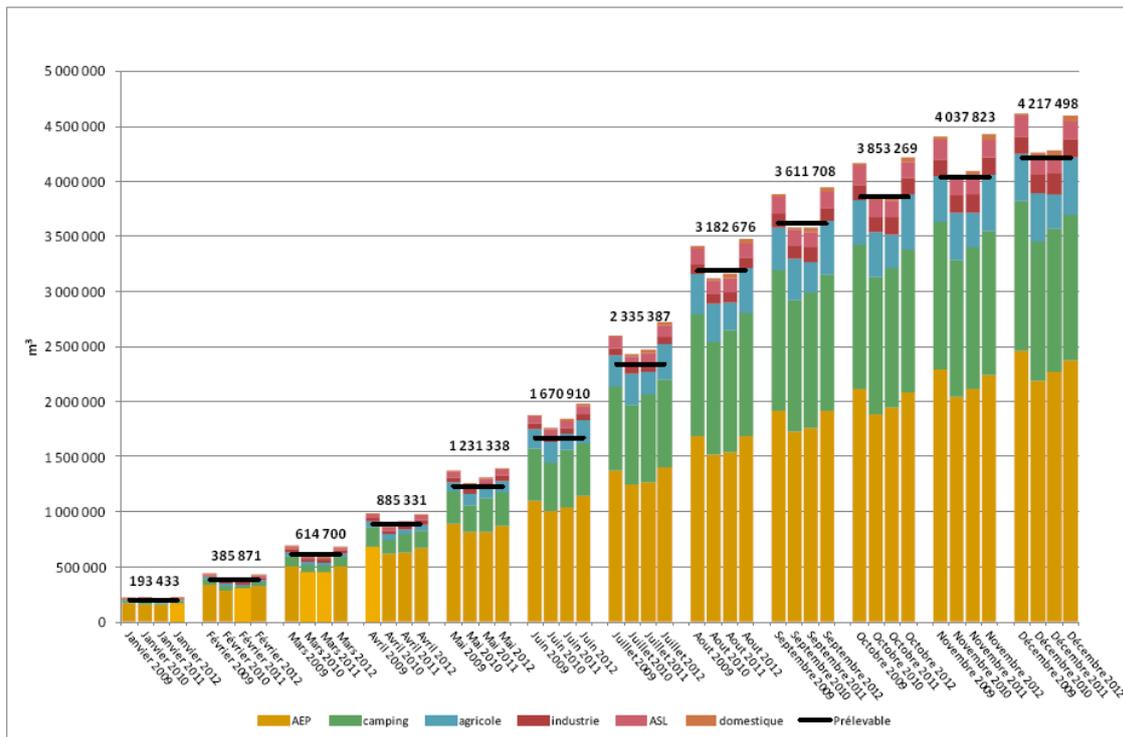


Illustration 24 – Comparaison mois par mois des volumes prélevés de 2009 à 2012 et des volumes prélevables de la nappe des sables astiens (ANTEA, 2013)

3.3.2. Plaine de Caen et bassin de la Dives : BRGM, 2014a

Contexte hydrogéologique

Le modèle bas-normand couvre les bassins versants de la Touques, de la Dives, de l’Orne, de la Seulles et de l’Aure ainsi que de petits bassins côtiers. Quatre aquifères principaux sont rencontrés : les calcaires du Bajocien et des formations sous-jacentes (Aalénien et Toarcien), les calcaires du Bathonien moyen et supérieur, les calcaires et sables de l’Oxfordien moyen et supérieur et la craie du Cénomanién.

Description du modèle hydrodynamique

Logiciel : Marthe

Le modèle comporte 10 couches, des alluvions aux formations de socle. Les limites correspondent aux limites des bassins versants hydrographiques supposés correspondre aux bassins versants hydrogéologiques : aucun flux d’échange avec l’extérieur sauf le long de la bordure maritime (potentiel imposé).

Il a été choisi d’utiliser une discrétisation en mailles carrées de 1 km de côté sur la majeure partie de l’extension du modèle et en mailles de 200 m de côté dans des secteurs où une plus grande précision était recherchée (réseau hydrographique en particulier).

Les relations nappe-rivières sont appréhendées de deux façons : (1) de manière explicite avec affectation de paramètres régissant les échanges nappe-rivières (largeur, longueur, cote absolue du fil d'eau, du fond de la rivière, épaisseur et perméabilité du lit) et (2) par utilisation de « mailles de débordement » (calcul d'un débit de débordement qui rejoint le tronçon le plus proche du réseau hydrographique).

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ simulation au pas de temps mensuel d'un scénario non influencé sur la période 1971-2010 et calcul des QMNA5 naturels à partir des chroniques de débits simulés pour les 67 unités hydrologiques identifiées ;
- ✓ simulation d'un scénario de pompage correspondant à l'année 2010 répété pour les 40 années de la simulation 1971-2010 et calcul des QMNA5. Les choix de l'année 2010 est justifié par le fait qu'elle soit la mieux connue en termes de prélèvements et représentative de la situation actuelle (forte baisse des prélèvements entre 1994 et 2010) ;
- ✓ calcul du ratio $QMNA5_{prelev2010}/QMNA5_{naturel}$ pour chaque unité hydrologique ;
- ✓ ajustement progressif d'un coefficient de réduction des prélèvements 2010 pour les unités hydrologiques où le ratio est inférieur à 70 %. Ce dernier a été décidé en Comité de Pilotage. La réduction se fait sur l'ensemble des prélèvements annuels et pas uniquement sur la période d'étiage. Les volumes prélevables sont ainsi déterminés par essai-erreur. À titre indicatif, le respect d'un impact maximal de 30% du QMNA5 en régime naturel conduit à envisager une réduction des prélèvements sur neuf unités hydrologiques (Illustration 25).

Zones	Nom Bassin versant	Prélèvements 2010 (1000m3)	Baisse appliquée sur prélèvements 2010	Baisse de prélèvements (1000m3)	Impact initial	Impact après baisse de prélèvements
Zone_25	Muance (La)	1 115	47%	524	67%	29%
Zone_16	Divette (La)	718	23%	167	40%	30%
Zone_18	Ancre (L')	1 136	10%	114	36%	30%
Zone_4	Dives aval (La)	1 613	0%	-	38%	27%
Zone_54	FRHC14 - BV côtier Ouest Orne	657	8%	49	33%	30%
Zone_65	Dan (Le)	1 707	62%	1 058	60%	30%
Zone_55	Gronde littoral (La)	407	82%	334	100%	23%
Zone_55	Provence (La)	407	82%		100%	30%
Zone_61	Aure aval (L')	761	15%	114	32%	30%
Zone_6	Aure inférieure (L')	1 523	44%	670	52%	30%
Zone_58	Aure inf. confluence Vire (L')	789	66%	517	58%	30%

Illustration 25 – Baisse des prélèvements permettant de ne pas dépasser un impact des pompages supérieur à 30 % du QMNA5 naturel (Rapport BRGM/RP-62863-FR)

Il est à signaler que l'utilisation des débits biologiques comme critère d'objectif s'est avérée infructueuse pour les nappes de la Plaine de Caen.

Le modèle a été réutilisé pour évaluer les volumes maximums prélevables sur le champ captant de Giberville selon la même méthodologie (Croiset, 2015). Il est intéressant de noter que les résultats ont fait l'objet d'une analyse de sensibilité : étude de la sensibilité du volume prélevable déterminé aux variations de la perméabilité de l'aquifère, de la perméabilité du lit du cours d'eau et de la répartition mensuelle des prélèvements AEP.

3.3.3. Nappe de la craie, bassin versant de la Somme : BRGM, 2014b

Contexte hydrogéologique

L'aquifère de la craie constitue la principale ressource en eau du département de la Somme. Le réservoir de la nappe est constitué par les craies perméables du Turonien supérieur et du Sénonien et, très localement en vallée humide, par les sables et graviers des alluvions anciennes.

La nappe de la craie est drainée par les cours d'eau. Selon les saisons, les échanges entre la rivière et la nappe varient : la nappe soutient les débits de la Somme et de ses affluents en période de basses eaux, et contribue jusqu'à 80% du débit de la Somme en période hautes eaux.

Description du modèle

Logiciel : Marthe

Modèle monocouche, discrétisé en mailles de 500 m de côté et subdivisées en maille de 100 m dans la vallée humide de la Somme. Le modèle simule les écoulements dans la nappe de la craie, les écoulements dans le réseau hydrographique associé, et les interactions entre ces deux systèmes (pas de loi hauteur-débit).

Le modèle fonctionne avec un pas de temps journalier pour les calculs hydroclimatiques (calcul du ruissellement et de la recharge) et un pas de temps hebdomadaire pour les écoulements souterrains.

Modèle maillé couplé à un modèle global pluie-débit pour l'évaluation de la recharge et prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations.

Dans le cadre de l'étude d'évaluation des volumes prélevables, la calibration du modèle a été reprise sur la période 1989-2012 (une dérive du modèle était constatée à partir de 2006). Il est rappelé que la finalité première du modèle était de prévoir les hautes eaux sur le bassin (modèle développé suite aux inondations exceptionnelles de 2001).

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ délimitation des unités de gestion à partir de l'analyse des chroniques piézométriques (zonation des régimes de fluctuation), de la répartition des prélèvements, de leur impact sur le niveau de la nappe (résultats du modèle maillé) et des stations de mesure disponibles (chaque unité de gestion doit disposer d'un piézomètre et d'une station hydrométrique). Initialement, dix unités de gestion avaient été retenues ; le Comité de Pilotage de l'étude a décidé d'en fusionner certaines pour en réduire le nombre à 7 ;
- ✓ sélection d'un couple station hydrométrique – piézomètre de référence pour chacune des unités de gestion (stations en service, qualité des chroniques, analyse corrélatoire croisée entre débits et niveaux piézométriques) ;
- ✓ recherche d'une relation univoque entre niveau piézométrique et débit. Elle n'a pu être trouvée pour deux unités de gestion et cet indicateur potentiel n'a, par conséquent, pas été utilisé dans la suite de l'étude ;

- ✓ étude de l'impact des prélèvements en nappe sur le débit des cours d'eau par l'intermédiaire de 5 simulations : 1) conditions réelles, 2) sans prélèvements agricoles, 3) sans aucun prélèvement, 4) arrêt des pompages agricoles situés à moins d'un km de la rivière et 5) réduction de 50% des pompages agricoles situés à moins d'un km de la rivière ;
- ✓ construction d'un scénario climatique visant à traduire la notion fréquentielle de la Circulaire du 30 juin 2008 (respect des objectifs 8 années sur 10) : pluies moyennes sur une période de simulation de 7 ans et 8 mois, suivies de pluies de période de retour 5 ans sec appliquées à partir de septembre sur une période de simulation de 4 ans. Ce scénario a été construit au pas de temps journalier après analyse statistique des séries de pluie et d'ETP et étude de la distribution des pluies journalières ;
- ✓ simulation de 8 scénarios de pompage en mode prévision sur la durée du scénario climatique préalablement construit : situation non influencée (sans prélèvements), avec prélèvements (60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 120% et 150% du volume prélevé en 2005, identifiée comme année de référence par le COPIL). Les prélèvements sont répétés chaque année de la simulation ;
- ✓ si nécessaire, correction des débits simulés à la date de démarrage des prévisions à partir des écarts moyens mensuels entre débits observés et débits simulés ;
- ✓ évaluation de l'atteinte ou du franchissement du Débit d'Objectif Biologique défini par ailleurs (AMEVA, 2013) et estimation du volume mobilisable, celui pour lequel le DOB n'est pas franchi pendant la première année sèche quinquennale. En effet, il est considéré que le volume mobilisable correspond au volume pour lequel le DOB n'est pas atteint pendant la première année quinquennale sèche simulée après une succession d'années moyennes. Le franchissement d'autres seuils a également été étudié lorsqu'ils étaient disponibles (arrêté cadre du 26/03/2012 : seuils de vigilance, d'alerte renforcée et de crise) ;
- ✓ des **volumes prélevables annuels** ont été proposés pour 3 des 5 unités de gestion. L'estimation n'a pas été possible pour 2 unités, soit parce que les prélèvements se situent principalement à l'aval de la station hydrométrique où le DOB a été calculé, soit parce que le DOB est d'ores et déjà dépassé une année sur cinq en situation non influencée.

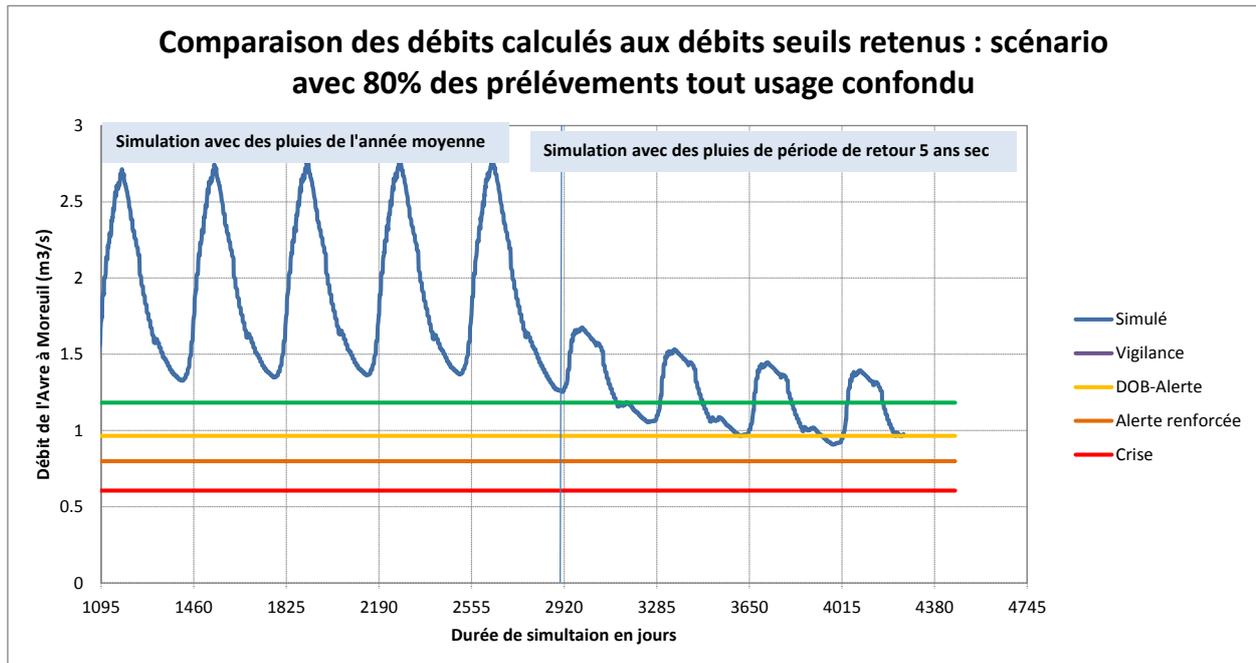


Illustration 26 : Débits de l'Avre à Moreuil simulés pour un scénario de réduction des prélèvements de 20 %

Une méthodologie identique avait antérieurement été mise en œuvre sur le bassin Oise-Aronde (bureau d'études HYDRATEC). Par soucis de cohérence régionale, le Comité de Pilotage a souhaité la reconduire pour le bassin versant de la Somme.

3.3.4. Nappes du Jurassique de Poitou Charentes BRGM, 2010

Contexte hydrogéologique

Le modèle s'intéresse aux nappes du Jurassique inférieur (Infra-Toarcien), moyen (Dogger) et supérieur, ainsi qu'à une partie du Crétacé nord de la région. Les relations sont étroites avec le réseau hydrographique et le Marais Poitevin.

Description du modèle

Logiciel : Marthe

Le modèle du Jurassique de Poitou-Charentes a été conçu pour répondre à une problématique de gestion quantitative des nappes du Dogger et de l'Infra-Toarcien, très exploitées pour l'AEP et l'irrigation (premier modèle achevé en 2007, en évolution constante depuis).

Le modèle s'étend de Châtelleraut au Nord à Angoulême/Rochefort au Sud, en incorporant les bassins versants nord du Marais Poitevin (en Vendée). La superficie de la zone modélisée est de 19 200 km².

Il s'agit d'un modèle multi-couches (8) avec un maillage principal de 1 km de côté (mailles de 333 m en périphérie du Marais Poitevin et de 100 m dans le bassin de la Sèvre-Niortaise avec caractérisation des échanges nappe-rivières).

En régime transitoire, le modèle fonctionne avec un pas de temps hebdomadaire entre les mois de mai et août inclus et mensuel pour le reste. La période modélisée couvre les années 2000-2007.

Le modèle hydrodynamique souterrain est couplé au réseau hydrographique (plus de 3000 km de cours d'eau), avec considération d'une loi hauteur-débit (Manning-Strickler).

L'outil de gestion des prélèvements ainsi élaboré a été utilisé à plusieurs reprises :

- 2010 : utilisation du modèle pour proposer des règles de gestion des prélèvements agricoles à la périphérie du Marais Poitevin et tester les objectifs du SDAGE Loire-Bretagne (Rapport BRGM/RP-58297-FR) ;
- 2011 : quantification de l'impact sur les nappes et les cours d'eau des prélèvements agricoles et AEP, de projets de retenues de substitution dans le bassin de la Boutonne (17) et d'un scénario de changement climatique sur la période 2050-2070 (Rapport BRGM/RP-59288-FR) ;
- 2012 : simulations réalisées à la demande de la DDT de la Vienne pour la gestion conjoncturelle des prélèvements agricoles du département (Rapport BRGM/RP-61773-FR) ;
- 2015 : étude d'impact du plan de répartition des prélèvements agricoles gérés par l'EPMP (Etablissement Public du Marais Poitevin) en tant qu'OUGC (Organisme Unique de Gestion collective).

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

Nous présentons ici le travail réalisé en 2010 qui visait à estimer les volumes prélevables en périphérie du Marais Poitevin pour les différentes unités de gestion et sur la base des niveaux piézométriques objectifs fixés dans le SDAGE Loire Bretagne. Ces derniers ont été déterminés par un groupe d'experts en 2007 ; deux objectifs ont été fixés : piézométrie objectif de début d'étiage (POEd, jusqu'au 15 juin) et piézométrie objectif de fin d'étiage (POEf, après le 15 juin). La démarche suivie par le BRGM est la suivante :

- ✓ adaptation du modèle du Jurassique à la gestion quantitative du Marais (subdivision des mailles kilométriques en 9 en périphérie du marais, etc.) ;
- ✓ présentation des résultats du calage par unité de gestion (prélèvements agricoles introduits, stockage/déstockage des aquifères, échanges nappe-rivière, dépassements des niveaux d'objectif) ;
- ✓ analyse statistique des données de précipitations dans le but de définir une année quinquennale sèche afin de répondre au respect des objectifs 4 années sur 5. L'année 2002 est ainsi retenue comme année de référence pour le printemps (respect du POEd) et l'année 2003 pour l'été (respect du POEf) ;

- ✓ simulations sur 2000-2007 de trois catégories de scénarios arrêtées par le Comité de Pilotage de l'étude. Il est noté que si la période de simulation est courte, celle-ci couvre à la fois des années sèches et humides :
 - 4 scénarios de baisse des prélèvements agricoles (suppression, -75, -50 et -25 %). Les baisses sont appliquées aux prélèvements réels pour chaque point de prélèvement et chaque pas de temps ;
 - 3 scénarios de baisse des prélèvements agricoles sur le printemps (avant le 15 juin ; -100, -50 et -30 %) et maintien des prélèvements estivaux ;
 - 2 scénarios basés sur les objectifs de prélèvements fixés dans le SDAGE : 1) application des objectifs sur 2000-2007 et 2) objectifs mais avec -50 % sur les prélèvements de printemps et report sur la période estivale dans le but d'étudier l'intérêt de modifier la répartition des prélèvements dans l'année.
- ✓ estimation des pourcentages de réduction nécessaire pour respecter les niveaux objectifs par piézomètre de référence et par année (le pourcentage est calculé par interpolation quand l'objectif est atteint entre 2 scénarios) ;
- ✓ détermination des volumes disponibles à partir d'un unique piézomètre de référence par unité de gestion, avec un volume prélevable pour le printemps (année de référence = 2002, hiver/printemps sec) et un volume pour l'été (année de référence = 2003, été particulièrement sec).

3.3.5. Nappe des alluvions fluvio-glaciaires de l'Est lyonnais : BURGEAP, 2010 et 2013

Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique n'est pas décrit dans les rapports d'étude consultés.

Des échanges sont possibles entre la nappe des alluvions fluvio-glaciaires et l'aquifère molassique et/ou certaines collines morainiques mais les flux associés restent inconnus. Avec la recharge de l'aquifère molassique, c'est la principale incertitude mise en avant par Burgeap.

Description du modèle hydrodynamique

Logiciel : Visual Modflow

Le modèle NAPELY n'est pas décrit dans les rapports consultés. Une actualisation du modèle a été effectuée en 2013, notamment pour prendre en compte la rivière Ozon et de la zone humide associée (dont une part importante de l'alimentation provient de la nappe). Cette actualisation fait suite à la détermination des DB en 2012 en deux points de la rivière.

La prise en compte des échanges par le modèle n'est cependant pas précisée.

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ délimitations de trois couloirs et définition de points nodaux de référence (6 piézomètres et 1 station hydrométrique) par analyse croisée des chroniques de données, de la qualité de la station de mesure et des enjeux ;
- ✓ détermination des Niveaux Piézométriques d'Alerte (NPA) par simulation de différents scénarios de prélèvement (6) au pas de temps mensuel sur 10 ans : maintien entre flux entrant et flux sortant à partir d'une recharge moyenne caractéristique de la période 1991-2009 sur 8 ans puis recharge faible sur deux ans (année 2007, intensité rencontrée 2 fois les 10 dernières années). Les six scénarios de prélèvement ne sont pas précisés ;
- ✓ en 2013, les volumes prélevables ont été révisés avec l'intégration de deux nouveaux critères : un apport minimal de la nappe pour respecter les DB de l'Ozon (une valeur en étiage et une valeur en période de recharge) et définition d'un NPA correspondant au maintien d'une nappe subaffleurante au droit de la roselière pour le piézomètre de référence le plus proche de la zone humide. Il faut noter que la prise en compte de nouveaux critères sur le débit de l'Ozon et sur la zone humide a entraîné une baisse nette du volume prélevable sur le sous-secteur concerné dans le couloir d'Heyrieux ;
- ✓ proposition de volumes prélevables annuels pour chacun des trois couloirs identifiés (issus des scénarios simulés pour déterminer les NPA) et répartis par usage selon les proportions moyennes actuelles. Les volumes prélevables ont été comparés aux prélèvements des années 2007 à 2011 : 1 dépassement en 2009 pour le couloir de Meyzieu et marge disponible pour les couloirs de Décines et d'Heyrieux.

3.3.6. Nappe alluviale du Rhône, Péage de Roussillon : BRL / HYDROFIS, 2014/2015

Contexte hydrogéologique

Les alluvions sablo-caillouteuses du Rhône héberge une nappe en relation étroite avec les eaux superficielles (Rhône, canaux, affluents, zones humides). Elles sont couvertes de façon discontinue par des limons de débordement argilo-sableux.

La réalimentation de la nappe se fait principalement par les apports des aquifères bordiers (terrasses alluviales, aquifère molassique) et par le réseau hydrographique (canalisé ou non) et dans une moindre mesure par l'infiltration météorique (<10 % de la réalimentation globale).

Les échanges entre la nappe et les cours d'eau sont variables spatialement et/ou temporellement.

Description du modèle hydrodynamique

Logiciel : Visual Modflow

Un modèle monocouche a initialement été développé par Burgeap en 2007. Le maillage est constitué d'éléments de 20x23 mètres (165 000 mailles). Les conditions aux limites sont à condition de flux imposé en bordure, et de potentiels variables pour modéliser les différents cours d'eau jouant un rôle dans l'alimentation ou le drainage de la nappe alluviale.

Suite à l'évaluation du modèle, BRL/Hydrofis ont apporté quelques modifications pour le rendre plus robuste et répondre à la question des volumes prélevables. Elles portent pour l'essentiel sur la révision de certaines conditions aux limites et des flux moyens annuels des aquifères bordiers.

Le modèle actualisé a été calé sur l'année 2009 au pas de temps journalier. Ce dernier est justifié après analyse de la temporalité des phénomènes en jeu (crues, fluctuations piézométriques, etc.). La nécessité de transformer des prélèvements mensuels en journaliers par extrapolation conduit à un calage de moins bonne qualité à proximité des principaux pompages.

Les principales incertitudes liées à la modélisation, et énoncées par BRL, concernent les flux d'échange avec les aquifères bordiers aux limites du modèle, le degré de colmatage des cours d'eau (ajustés lors du calage), la structure monocouche du modèle qui ne permet pas de prendre en compte les limons de couverture et l'exclusion de la plaine alluviale en rive droite du Rhône libre à l'aval (nombreux prélèvements pouvant influencer les niveaux piézométriques en rive gauche). On peut ajouter à cette liste la très courte période de calage (une année, donc pas calé !).

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ sectorisation de la nappe modélisée selon une logique hydrogéologique (apports latéraux, limites, rôle du canal vis-à-vis de l'alimentation de la nappe, etc.) et sélection de piézomètres de contrôle ;
- ✓ simulation de référence sans prélèvements pour l'année 2009 et analyse de l'impact des prélèvements : carte de rabattements, chronique point par point du gain piézométrique avec un régime non influencé (en m) ;
- ✓ définition de scénarios de prélèvements et application sur une année type correspondant à une situation hydrologique peu favorable, rencontrée une année sur cinq. Cette année quinquennale sèche a notamment été construite à partir d'une analyse fréquentielle des débits et des niveaux piézométriques ;
- ✓ identification des enjeux pour chacun des sept secteurs : enjeux AEP, enjeux liés à la préservation du bon état écologique des zones humides (3 secteurs) ;
- ✓ définition des objectifs pour le besoin des usages AEP (position des crépines) et des objectifs sur les trois secteurs présentant des habitats prioritaires. Pour ces derniers, trois niveaux d'exigences ont été proposés : le volume prélevé permet le maintien de la connexion pour 50% des habitats prioritaires (par rapport à la piézométrie simulée sans prélèvement), pour 75 % et pour 90 %. Chacun de ces scénarios correspond à un volume prélevable. À l'issue de l'étude, ont été définis pour 3 piézomètres de référence un NPA correspondant au seuil de 75% et un NPCR correspondant au seuil de 50 % ;
- ✓ si le secteur est à enjeu, les volumes prélevables devront satisfaire les objectifs liés à ces enjeux, si le secteur n'est pas concerné par des enjeux locaux, les prélèvements ne devront pas impacter les secteurs voisins à enjeux (impact sur secteur voisin limité à 10 cm) ;

- ✓ plusieurs scénarios de prélèvements simulés par secteur, deux cas de figure sont distingués :
 - secteurs à enjeux locaux avec prélèvements actuels ne respectant pas les objectifs : scénarios de réduction jusqu'à satisfaction des enjeux par une démarche itérative ;
 - secteurs avec un niveau de prélèvement actuel permettant de respecter les objectifs : scénario d'augmentation des prélèvements (atteinte des volumes maximums autorisés pour les forages AEP, prélèvements agricoles actuels, introduction éventuelle de nouveaux forages avec les règles suivantes : débit de 0,1 m³/s pour chacun et distance inter-forage minimale de 200 m.
- ✓ pour chaque secteur, un volume prélevable exprimé en m³/j et constant quel que soit le mois de l'année est fourni (ce choix est justifié par BRL comme une mesure de prudence compte tenu des inconnues relatives à l'influence de l'augmentation des prélèvements hivernaux sur les effets positifs des crues) (Illustration 27).

Secteur hydrogéologique	Volumes prélevables (m ³ /j)			Volumes prélevés maximum (m ³ /j)	Volumes autorisés maximum (m ³ /j)
	Objectifs de connexion				
Secteurs à enjeu	50%	75%	90%		
Limony	35 000	20 000	10 000	6 000	22 000
Platière Nord	23 000	14 000	5 000	5 000	8 000
Platière Centre	80 000	40 000	15 000	115 000	181 000
Secteur hydrogéologique	Impact sur les secteurs voisins		Volumes prélevés maximum (m ³ /j)	Volumes autorisés maximum (m ³ /j)	
Secteurs impactant les voisins	(sur)-rabattement moyen	(sur)-rabattement faible			
Platière Sud	45 000	35 000	22 000	33 000	
Terrasse Nord	25 000	15 000	40 000	217 500	
Terrasse Sud	25 000	15 000	27 000	43 000	
Aval Usine de Sablons	15 000		7 000	11 000	

Illustration 27 – Volumes prélevables pour les 7 secteurs hydrogéologiques de la nappe alluviale du Péage de Roussillon (extrait du rapport BRLi/Hydrofis, 2015)

3.3.7. Nappe des alluvions anciennes de Dijon Sud : BRL, 2011

Contexte hydrogéologique

La nappe de Dijon Sud est contenue dans les dépôts quaternaires anciens de la vallée de l'Ouche. L'aquifère est constitué de deux horizons productifs séparés par un semi-perméable appelé "couche moutarde".

Une alimentation en provenance des coteaux est mise en évidence : « par les eaux du karst avec les séries oligocènes détritiques en relai. »

Description du modèle hydrodynamique

Logiciel : Visual Modflow

Le modèle hydrogéologique est constitué de 5 couches : conglomérats oligocène, aquifère superficiel (graviers), couche moutarde, aquifère profond (graviers) et calcaires jurassiques.

Le domaine modélisé possède une superficie de 84 km² avec des mailles de 250 m de côté. Plus au sud, l'aquifère n'a pas été modélisé faute d'information sur sa géométrie.

Plusieurs limites sont à condition de charges imposées (rivière Ouche, bordure ouest du Jurassique, zone de résurgence de la Cent Fonts) et de flux imposés (mailles d'injection pour représenter les venues d'eau sous-alluviales).

Le calage en régime transitoire a été effectué au pas de temps mensuel sur la période 1987-1997.

La prise en compte des échanges avec le réseau hydrographique n'est pas décrite.

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ simulations de sept scénarios de prélèvement pour des conditions climatiques équivalentes à celles des 20 dernières années (respect des équilibres actuels quant à la répartition des prélèvements) :
 - 2 scénarios pour étudier l'impact du champ captant des Gorgets sur les débits de la source des Cent Fonts : 1) arrêt du champ captant et 2) majoration de 50% ;
 - 5 scénarios prospectifs : 9 Mm³/an (situation de surexploitation de la nappe rencontrée de 1988 à 1993), 8, 7 et 6 Mm³/an.
- ✓ détermination d'un volume annuel prélevable sur la base du respect 8 années sur 10 d'un Débit Objectif d'Étiage défini comme le DB des Cents Fonts à Saulon-la-Rue ;
- ✓ simulation de scénarios complémentaires (volume global de 7 Mm³/an) dans le but d'explorer différentes options d'exploitation de la ressource : report d'une part des prélèvements agricoles en période hivernale (stockage), répartition des prélèvements entre nappe superficielle et nappe profonde, répartition des prélèvements sur les différents champs captants.

3.3.8. Nappe alluviale de la basse vallée de l'Ain : Artelia, 2013

Contexte hydrogéologique

La nappe alluviale de la plaine de l'Ain correspond à un fossé d'effondrement tertiaire tapissé, au cours des périodes interglaciaires du Quaternaire, par d'importants dépôts qui ont constitué les terrasses d'alluvions fluvio-glaciaires. Ces formations alluviales possèdent une épaisseur variant de 5 à 30 m.

Le substratum des dépôts Quaternaires le plus couramment rencontré est constitué de dépôts Tertiaires du Miocène. Il s'agit de formations argilo-sableuses irrégulièrement consolidées en grès.

La contribution de la nappe alluviale à l'écoulement de l'Ain présente un enjeu particulier avec un rôle de régulation thermique du cours d'eau (activité hydro-électrique).

Description du modèle hydrodynamique

Logiciel : Visual Modflow

Le domaine modélisé a une superficie de 360 km². Le maillage principal est de 100 m par 100 m avec localement des dimensions de mailles réduites à 50 m par 67 m. Il s'agit d'un modèle monocouche.

Les échanges nappe-rivières ont été modélisés à l'aide du module Stream du code de calcul Modflow (loi hauteur-débit, Manning-Strickler).

Le modèle a été calé en régime transitoire sur la période 2002-2007 au pas de temps décadaire.

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ distinction de deux zones en fonction des enjeux ;
- ✓ simulation de trois scénarios de réduction des prélèvements au pas de temps décadaire sur la période 2003-2007 :
 - réduction des prélèvements d'étiage (juin à août) de 10 % pour 2004 et 2005, de 30 % pour 2003 (prélèvements 2006 et 2007 inchangés) ;
 - réduction des prélèvements d'étiage (juin à août) de 30 % pour 2004 et 2005, de 50 % pour 2003 ;
 - réduction des prélèvements d'étiage (juin à août) de 40 % pour 2004 et 2005, de 50 % pour 2003.
- ✓ pour la zone à enjeux, un volume prélevable est déterminé sur la base de deux critères : (1) respect des conditions de l'étiage 2006 (notamment les débits d'échange entre la nappe et la rivière pour les trois décades de juillet les plus sèches) et (2) impact limité à 30 % de la recharge annuelle. L'année 2006, caractérisée par une période chaude et sèche entre mi-juin et début août, a été retenue comme année de référence en termes d'objectif minimum acceptable pour le cours d'eau 4 années sur 5 (température, prolifération algale, mortalité piscicole) ;
- ✓ en dehors de la zone à enjeux, les critères retenus sont : (1) restaurer intégralement la réserve aquifère lors d'un cycle hydrologique et (2) ne pas dépasser par précaution un ratio annuel prélèvement/recharge de 30 %. Ces deux conditions ayant été respectées lors de l'étiage 2003 (année décennale sèche), le volume prélevable finalement proposé correspond à celui effectivement prélevé en 2003 ;
- ✓ pour les deux zones, deux volumes prélevables sont présentés : un volume annuel et un volume pour la période estivale.

3.3.9. Nappe alluviale du Garon : BRL, 2013

Contexte hydrogéologique

La nappe alluviale du Garon est fortement connectée aux eaux de surface. Elle est alimentée en majeure partie (80 à 95%) par l'infiltration (pluie, ruissellement de surface et infiltrations du Garon) et reçoit peu d'apports latéraux.

Deux compartiments principaux séparés par le seuil des Mouilles peuvent être distingués, ils ont des dynamiques de renouvellement bien distinctes. Le compartiment amont, déconnecté du réseau hydrographique de surface, est caractérisé par un faible gradient hydraulique et un temps de renouvellement très lent. Le compartiment aval présente un gradient hydraulique plus élevé (du Nord vers le Sud) et est fortement lié au réseau hydrographique de surface, son renouvellement est plus rapide.

Description du modèle hydrodynamique

Logiciel : Feflow

Il s'agit d'un modèle monocouche d'une superficie de 15.3 km². Le maillage est constitué de mailles de dimension variable : 500, 250 et 125 m. Les simulations sont faites au pas de temps mensuel.

La gestion des échanges nappe-rivière par le modèle n'est pas décrite.

De nombreuses incertitudes sont énumérées par BRL (schéma conceptuel hydrogéologique, méconnaissance des prélèvements et des débits du Garon, calage, etc.).

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ distinction de deux secteurs (amont et aval) ;
- ✓ simulation d'un premier scénario non influencé (sans prélèvement) sur la période 1980-2010 dans le but d'évaluer la contribution de la nappe aux cours d'eau en régime naturel. Les séries climatiques existantes sont utilisées ;
- ✓ simulation de cinq scénarios prospectifs de réduction des prélèvements sur la période 1980-2010 : 4,5 et 6 Mm³/an ainsi que 5,5 Mm³/an avec deux états piézométriques de départ (non influencé, état actuel = exploitation forte) ;
- ✓ simulation exploratoire avec report de tous les prélèvements sur la nappe amont sur la période 1980-2010 pour un prélèvement total de 4 Mm³/an ;
- ✓ première analyse des résultats en fonction des deux secteurs :
 - amont : impact sur le piézomètre de référence de Vourles (cote à ne pas dépasser correspond à la cote de sources de la Mouche, 175 m NGF) ;
 - aval : gain d'alimentation du cours d'eau par la nappe (décrochée sous l'effet des pompes).

- ✓ pour le secteur aval, comme le gain en termes de retour vers les eaux superficielles s'est avéré marginal en période d'étiage, le volume prélevable est finalement déterminé de façon à obtenir un bilan moyen équilibré sur la période 1990-2010 ;
- ✓ deux volumes prélevables annuels sont proposés (usage AEP) : un scénario prudentiel (5 Mm³/an) et un scénario plus risqué (5,5 Mm³/an). Ces résultats ont été confrontés à une analyse comparée des évolutions des prélèvements, des pluies efficaces et des niveaux piézométriques (résultats concordants avec les observations).

3.3.10. Nappe alluviale de l'Ariège : BRGM, 2009

Contexte hydrogéologique

La nappe alluviale de l'Ariège est caractérisée par :

- une phase de recharge hivernale débutant au mois de novembre avec un maximum des niveaux généralement atteint en février. À cette époque de l'année, les sols sont saturés et la lame d'eau infiltrée importante. Selon l'intensité et la persistance de la période pluvieuse, une décrue partielle intervient entre février et avril, suivie d'une nouvelle phase de recharge printanière observée généralement entre mai et juin ;
- une phase de tarissement régulière et prononcée des niveaux d'eau démarrant au début de l'été, entre mai et juin ;
- une phase de décroissance très lente correspondant à l'étiage et se poursuivant habituellement jusqu'au mois de novembre.

La profondeur de la nappe par rapport au sol est variable, comprise entre 0 et 10 m, avec une profondeur moyenne de 3,5 m.

Description du modèle hydrodynamique

Logiciel : Marthe

Le modèle couvre la zone des alluvions récentes de l'Ariège et de l'Hers Vif, des formations fluviatiles quaternaires de la basse plaine et de celles des basses terrasses. Il est limité latéralement par les coteaux molassiques, par les terrasses plus anciennes et par l'Ariège et l'Hers Vif.

Le modèle comprend 2 couches : l'une pour les alluvions, l'autre pour la molasse sous-jacente.

La taille des mailles est de 250 m et le pas de temps de la modélisation est de 1 mois.

Le réseau hydrographique est modélisée de façon spécifique avec l'intégration des données suivantes : longueurs et aux largeurs de tronçon des rivières à l'intérieur de chaque maille, cotes absolues du fond des cours d'eau, hauteurs d'eau, épaisseur et perméabilité des berges. Ces deux derniers, peu connus, ont été considérés comme des paramètres de calage. Les pentes des rivières et le coefficient de rugosité sont également nécessaires pour calculer la hauteur dans le cours d'eau selon une loi hauteur-débit (Manning-Strickler).

La pluie efficace est calculée en utilisant un schéma GARDENIA (modèle à réservoirs) sur 7 zones de recharge distinctes. Un coefficient de ruissellement est ensuite ajusté aux différentes terrasses alluviales étudiées.

Le modèle a été calé à partir des niveaux piézométriques de la nappe mesurés dans 23 ouvrages de référence, d'une part, et à partir des chroniques de débits mesurés aux deux points nodaux présents sur la zone modélisée, d'autre part.

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ définition de 8 unités de gestion sur la base de la géologie, des sens d'écoulement souterrain, de la répartition des coefficients d'emménagement et des principaux prélèvements ;
- ✓ définition de 6 scénarios climatiques croisant différentes recharges hivernales (octobre à mars) et différentes recharges printanières (avril à juin). Au préalable, une analyse statistique des pluies efficaces calculées entre 1995 et 2007 a été conduite pour les trois stations de mesure utilisées ;
- ✓ simulation d'un état piézométrique de référence correspondant au maintien des DOE de l'Ariège et l'Hers Vif fixés dans le SDAGE. La simulation est réalisée sur huit années au pas de temps mensuel. Les cinq premières années sont identiques au calage en régime transitoire (de 2000 à 2005). Les deux suivantes correspondent à des données moyennes (recharge et prélèvements associés à une année moyenne) et la dernière correspond à une année décennale sèche (recharge et prélèvements). Les deux années moyennes sont introduites pour stabiliser les niveaux piézométriques avant d'intégrer le scénario extrême. Il s'agit donc de la piézométrie simulée en septembre à partir d'un état piézométrique moyen au mois d'octobre précédent et après une simulation sur 12 mois avec un scénario climatique décennal sec ;
- ✓ simulation en régime transitoire sur 8 ans au pas de temps mensuel : les 7 premières années sont identiques à la simulation de l'état de référence et la dernière correspond à un des 6 scénarios climatiques élaborés. Six états piézométriques différents sont ainsi générés à la fin du mois d'avril, avant le début de la période d'irrigation ;
- ✓ les volumes prélevables durant la période d'irrigation (mai à septembre) sont calculés pour chaque scénario climatique et pour chaque unité de gestion en soustrayant les états piézométriques simulés à l'état de référence préservant les DOE. Ces volumes sont calculés en prenant en compte la surface des mailles et le coefficient d'emménagement (Illustration 28).

Le BRGM met en garde sur l'utilisation des résultats : « *incertitudes inhérentes à la construction et au calage du modèle, en particulier vis-à-vis des cotes du substratum, des valeurs de porosité efficace ou celles de perméabilité et également par rapport aux approximations et hypothèses prises sur la répartition des volumes annuels prélevés* ».

Cette modélisation a finalement débouché sur la mise en place d'un outil de gestion destiné aux services chargés de la Police de l'Eau pour la délivrance des autorisations de prélèvements en période d'irrigation (interface Excel©).

- **Détermination d'un état piézométrique de référence** : Etat piézométrique dont le dépassement serait dommageable pour la ressource, **état piézométrique modélisé associé au maintien du débit biologique d'étiage du cours d'eau.**
- **Pour un scénario climatique donné et dans une unité de gestion donnée, le volume exploitable est calculé comme suit :**

$$V_{exp} = \sum_i (H_{Sc}^i - H_{Ref}^i) S_i \cdot A_i$$

H_{Sc}^i : le niveau de la nappe dans la maille i pour le scénario climatique simulé,
 H_{Ref}^i : le niveau de la nappe dans la maille i pour l'état piézométrique de référence
 S_i est le coefficient d'emménagement dans la maille i ,
 A_i est la superficie de la maille i .
La sommation se fait sur l'ensemble des mailles couvrant l'unité de gestion.

Illustration 28 : Calcul du volume prélevable sur la base d'un état piézométrique de référence (extrait du rapport BRGM/RP-57184-FR)

3.3.11. Nappes alluviales Giscle et Môle, ARTELIA / HGM, 2015

Contexte hydrogéologique

Des relations complexes entre les deux cours d'eau (Giscle et Môle) sont avérées avec principalement des zones de perte mais également une possible drainance de la nappe alluviale par la Giscle en aval. Les tronçons amont des cours d'eau sont concernés par des assecs marqués et longs, plus à l'aval, les assecs sont plus rares pour des raisons anthropiques (rejets, barrage de la Verne, barrage anti-sel).

La nappe alluviale est sensible aux intrusions salines, la surveillance mise en œuvre depuis plus de 20 ans permet une bonne compréhension du phénomène et une connaissance fine de l'évolution des avancées et régressions du front saumâtre (intrusion favorisée suite aux prélèvements excessifs sur 1970-1980).

Description du modèle

Logiciel : Visual Modflow

La zone modélisée correspond aux limites d'affleurement des alluvions quaternaires (Illustration 29). Il s'agit d'un modèle bicouche : limons et sables fins (dépôts fluvio-marins) sur alluvions fluviales plus grossières. Le modèle est discrétisé selon des mailles carrées de 50 m par 50 m.

Deux zones de recharge sont considérées (amont/aval), fonction de l'épaisseur de la première couche beaucoup moins perméable et des fluctuations piézométriques.

Les conditions aux limites sont de plusieurs type :

- condition de potentiel imposé sur la limite côtière (0 mNGF) ;
- condition de flux imposés en bordure afin de caractériser les apports liés aux eaux ruisselées sur les versants (part s'infiltrant dans la plaine). Onze zones distinctes d'apports latéraux ont été considérées.

Les échanges nappe-rivière ont été modélisés de façon explicite : loi hauteur-débit de Manning-Strickler à l'amont du barrage anti-sel et ligne d'eau imposée à l'aval. Les assecs temporaires des cours d'eau peuvent ainsi être simulés.

Le calage en régime transitoire a été effectué sur la période 1998-2012 au pas de temps mensuel.

La modélisation de l'intrusion saline (module SEAWAT) a été réalisée à la suite du calage de la modélisation hydrodynamique, car elle demande quelques ajustements : extension plus limitée, subdivision de la première couche en trois, modélisation explicite des échanges nappe-rivière mais sans loi hauteur-débit, etc. Les résultats montrent que l'intrusion saline dans la nappe est avant tout due à l'infiltration des eaux salées de la Giscle. Il est conclu que la mise en place du barrage anti-sel et l'arrêt du champ captant de Pasquier protègent désormais la nappe de ces intrusions.

Stratégie de simulation pour déterminer les volumes prélevables

- ✓ suite aux résultats de la modélisation de l'intrusion saline, l'étendue des assecs est retenue comme le critère de référence pour déterminer les volumes prélevables. Avec le niveau de prélèvement de ces 5 dernières années et avec un barrage anti-sel correctement entretenu, les risques d'intrusion sont, en effet, jugés négligeables ;
- ✓ neuf simulations croisant différentes conditions hydro-climatiques, différents scénarios de prélèvements et d'alimentation par les eaux du barrage de la Verne ont été définies par le COPIL de l'étude pour la période 1998-2012 :
 - scénario 1 dit « naturel » : conditions climatiques observées sans prélèvement ni rejet ;
 - scénarios 2_1 et 2_2 : reproduction d'une année type sur les 14 années de la simulation, avec des conditions hydro-climatiques moyennes (pluies moyennes mensuelles 1998-2012). Du point de vue des prélèvements, le scénario 2_1 est concerné par les prélèvements de l'année 2012 (1,8 Mm³/an pour l'AEP et 0,1 Mm³/an pour les privés) et le scénario 2_2 par une augmentation des prélèvements en nappe (3 Mm³/an pour l'AEP et 0,1 Mm³/an pour les privés) ;
 - scénarios 3_1 et 3_2 : idem scénario 2 avec des conditions hydro-climatiques sèches avec la pluviométrie de la période 1980-1993 (14 années consécutives les plus sèches depuis 1945). Pour les prélèvements, le scénario 3_1 est identique au 2_1 et le scénario 3_2 est concerné par les prélèvements moyens de 1998 à 2012 (2,2 Mm³/an pour l'AEP et 0,1 Mm³/an pour les privés) ;
 - scénarios 4 à 7 : pluviométrie observée entre 1998 et 2012 avec des scénarios de prélèvements AEP croissants : 1,5 ; 2 ; 2,5 et 3 Mm³/an.
- ✓ analyse des chroniques piézométriques et de l'étendue des assecs des deux cours d'eau (linéaire et durée) pour l'année 2004, année de type quinquennal sec pour la pluviométrie (Illustration 29). Pour les scénarios 4 à 7, année après année, l'étendue des assecs est comparée à celle de l'année 2004 du scénario naturel ;
- ✓ sur cette base, le Comité de Pilotage a décidé de retenir les prélèvements du scénario 7 comme acceptables pour garantir le bon état du milieu 8 années sur 10 pour la Môle et ceux du scénario 6 pour la Giscle. Les volumes prélevables résultants correspondent à des volumes maximums pour la période de juin à septembre (« valeurs guides ») ;

- ✓ identification de trois piézomètres d'alerte et détermination de NPA à partir du scénario 6 pour la Giscle et du scénario 7 pour la Môle. Le NPA correspond au niveau d'étiage simulé en 2004 (recharge quinquennale sèche). Il est ainsi proposé de moduler les volumes prélevables selon ces indicateurs piézométriques.

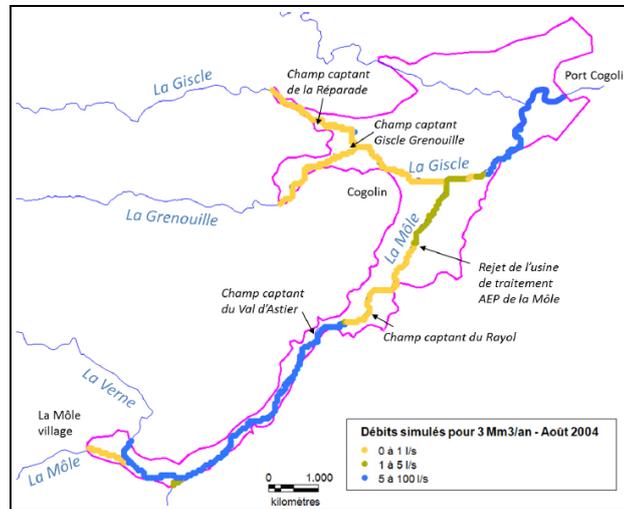


Illustration 29 : Débits simulés des rivières la Giscle et la Môle pour le mois d'août 2004 pour le scénario 7 (contour de la zone modélisée en rose) (extrait de ARTELIA / HGM, 2015)

3.4. SCÉNARIOS D'EXPLOITATION DE LA RESSOURCE

3.4.1. Scénarios de réduction des prélèvements et effet du changement climatique

Parmi les études consultées, plusieurs aboutissent à la proposition de scénarios de réduction des prélèvements. Ces derniers sont rapportés dans le tableau de l'illustration 30.

Il faut souligner que des efforts de réduction importants sont attendus sur de nombreux territoires ; plusieurs unités de gestion sont, en effet, concernées par des baisses de prélèvement de 40 % et plus pendant la période d'étiage.

Par ailleurs, peu d'études prennent en compte les impacts du changement climatique dans l'évaluation des volumes prélevables à plus long terme. À titre informatif, le tableau de l'illustration 31 dresse une synthèse des études concernées. Elles ont toutes été conduites par le bureau d'études Cereg Ingénierie selon la même méthodologie. Une baisse des précipitations estivales est appliquée sur la base des études de quantification de l'impact du changement climatique réalisées par l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) ; un scénario d'exploitation de la ressource est finalement proposé à l'horizon 2050.

La réduction des volumes prélevables à l'horizon 2050, liée à l'impact du changement climatique, varie de 5 à 10 % selon les bassins versants étudiés.

Bassin	Étude	Déficit quantitatif identifié	Scénarios de réduction des prélèvements
AG	Nappe alluviale de l'Ariège	Non pour les eaux souterraines	Non (simulations visant à reporter une part des prélèvements en rivière sur la nappe préconisées)
AG	Seudre	Oui	Irrigation à 0
AP	Craie Champagne	Non	Non
AP	Bassin versant de la Somme	Oui (1 seule unité de gestion)	Réduction de 20 % des prélèvements 2005
LB	Sud Vendée	Oui (3 unités de gestion sur 3)	Réduction des prélèvements d'été compris entre 20 et 50 %
LB	Périphérie du Marais Poitevin	Oui (4 unités de gestion sur 5)	Réduction de 50% des prélèvements agricoles : 70 à 80 % de réduction au printemps et de 30 à 50 % en été
LB	SAGE Cher amont	Oui (2 sous-bassins sur 8)	Réductions des prélèvements agricoles de 6 % par rapport au prélèvement annuel maximal (1996-2008) pour un sous-bassin et de 32 % pour le second
RMC	Est Lyonnais	Oui (Heyrieux et Meyzieu)	Réduction de 2.2 Mm ³ /an après concertation sur Meyzieu
RMC	Alluvions de l'Argens	équilibre retrouvé	Uniquement pour les prélèvements en rivière
RMC	Alluvions du Gapeau	Oui, retour à l'équilibre en 2010	Non
RMC	Karst Mosson	équilibre retrouvé	Non
RMC	Dijon Sud	Non	Non
RMC	Basse vallée de l'Ain	Oui	Période 2003-2007 : réduction des prélèvements estivaux (juin à août) comprise entre 30 % (2004/2005) et 50 % (2003)
RMC	Nappe alluviale du Garon	Oui	Période 2002-2009 : réduction globale des prélèvements comprise entre 6 et 43 % pour le scénario prudentiel
RMC	Drôme des collines	Oui	Réduction globale comprise entre 20 et 45 %
RMC	Galaure		Réduction globale de 40 %
RMC	Péage de Roussillon	Oui (1 zone à enjeu sur 3)	Réduction comprise entre 30 et 87 % en fonction de l'objectif de connexion à la nappe des habitats
RMC	Gisclé et Môle	Non	Non
RMC	Bassin de l'Asse	Non	Non
RMC	Bléone	Non	Non (volumes autorisés cependant > aux VP)
RMC	Haut-Doubs	Non	Gel des niveaux de prélèvement actuels (AEP)
RMC	Véore-Barberolle	Oui	Réduction de 40 % des prélèvements actuels en période d'étiage
RMC	Bassin du Lez	Oui	Juillet : réduction de 17 % sur le Lez et de 40 % sur l'Hérin Août et octobre : gel des prélèvements actuels Septembre : réduction de 40 % sur le Lez et de 30% sur l'Hérin
RMC	Bassin de l'Eygues	Oui	Réduction des prélèvements de 40 % sur l'ensemble du bv de juillet à septembre
RMC	Plaine du Breuchin	Oui (1 unité sur 4)	Pas de scénario de réduction. Règles de gestion de la prise d'eau du canal du Morbief à instaurer.
SN	Plaine de Caen	Oui (10 unités sur 67)	Réduction des prélèvements 2010 comprise entre 8 et 82 % (en fonction des unités)

Illustration 30 : Scénarios de réduction des prélèvements résultant de l'estimation des volumes prélevables (en gris : réduction de prélèvement non proposée)

Bassin	Étude	Méthodologie	Résultats
RMC	BV de l'Asse (Cereg, 2011a)	- Application d'une baisse globale des précipitations estivales de 25% (juin, juillet, août) (source : ONERC, ancien scénario A2 du GIEC) à la chronologie 1969-2008 - Simulation des débits naturels à l'horizon 2050	Réduction de 10% des VP sur la période estivale à l'horizon 2050
RMC	BV de la Bléone (Cereg, 2011b)		Réduction de 5% des VP sur la période estivale à l'horizon 2050
RMC	BV du Lez (Cereg, 2013)	- Application d'une baisse globale des précipitations estivales de 15% (juin, juillet, août) (source : ONERC, ancien scénario A2 du GIEC) à la chronologie 1978-2010 - Simulation des débits naturels à l'horizon 2050	Réduction de 10% des VP sur la période estivale à l'horizon 2050
RMC	BV de l'Eygues (Cereg, 2014)		

Illustration 31 : Estimation des volumes prélevables et prise en compte du changement climatique

3.4.2. Scénarios exploratoires

Comme vu précédemment, pour la plupart des études recourant à un modèle maillé, les volumes prélevables sont déterminés après simulation de différents scénarios de prélèvements. Ces derniers consistent en une augmentation ou, dans la majorité des cas, une baisse du niveau de prélèvement actuel tout en conservant les répartitions spatiales et temporelles ainsi que la répartition par milieu (eau superficielle, eau souterraine) en vigueur.

Peu d'études s'attachent finalement à tester des scénarios de prélèvements exploratoires, c'est-à-dire dans une configuration différente. Cette analyse, possible avec les modèles maillés, peut pourtant s'avérer très utile dans le but d'optimiser la gestion de la ressource en eaux et de préparer la phase de concertation entre les usagers.

L'intérêt de ce travail exploratoire est particulièrement renforcé au vu des efforts importants de réduction des prélèvements envisagés sur certains secteurs.

Le tableau de l'illustration 32 récapitule les différents scénarios de prélèvements exploratoires analysés dans les études consultées ainsi que les résultats obtenus en termes de bénéfice sur la ressource. Les scénarios étudiés explorent les pistes suivantes :

- modification de la répartition temporelle des prélèvements agricoles avec report d'une part des prélèvements estivaux en hiver (retenues de substitution) ;
- modification de la répartition spatiale des prélèvements en nappe : éloignement au cours d'eau, position aval/amont dans le bassin versant ;
- modification de la répartition entre ressources : nappe profonde / nappe superficielle, rivière / nappe.

Le dernier exemple présenté (Est Lyonnais, Burgeap, 2013) est également intéressant dans la mesure où les scénarios exploratoires concernent les conditions climatiques dans un objectif d'anticipation des situations de crise. Pour rappel, la nappe alluviale de l'Est Lyonnais n'affiche pas un déficit quantitatif particulier : les volumes prélevables calculés sont généralement supérieurs aux volumes mobilisés ces dernières années. Cette approche prend donc tout son sens dans un tel cas de figure.

Bassin	Étude	Simulations exploratoires	Résultats
AP	BV de la Somme (BRGM)	<ul style="list-style-type: none"> - Arrêt des forages agricoles situés à moins d'1 km de la rivière (162 ouvrages pour 4.6 Mm³ en 2005) - Réduction de 50% des volumes pompés par les forages agricoles situés à moins d'1 km de la rivière 	<ul style="list-style-type: none"> - Gain sur les débits d'étiage plus ou moins sensible d'une UG à l'autre - Ex. de l'Avre : gain de 145 L/s, soit 15% du QMNA5 (arrêt des forages < 1 km)
LB	Marais Poitevin (BRGM)	<ul style="list-style-type: none"> - Remplissage de retenues de substitution par des forages en hiver (novembre à mars) 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration sensible de la situation hydrologique en été sans impacter de façon significative la situation en hiver (même si recharge faible)
RMC	Dijon Sud (BRL)	<ul style="list-style-type: none"> - Report des 2/3 des prélèvements agricoles estivaux en hiver (stockage) 	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de respecter le DB pour un volume prélevable global de 7 Mm³/an (contre 6 M³/an dans la configuration actuelle)
		<ul style="list-style-type: none"> - 8 simulations croisant une répartition différente entre nappe profonde et nappe superficielle (50/50, 70/30 et 30/70) et report de prélèvements agricoles en hiver (50, 60 et 70 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - Gain ou perte relativement faibles sur les débits d'étiage (< 10 l/s)
		<ul style="list-style-type: none"> - majoration des prélèvements en nappe superficielle sur le secteur amont ou aval 	<ul style="list-style-type: none"> - Gain significatif avec un report amont des prélèvements (13 L/s, 8% du DB)
RMC	Drôme des collines, Galaure (Artelia)	<ul style="list-style-type: none"> - Étude du report des prélèvements en rivière vers la nappe via 4 familles de simulation : 1) suppression des prélèvements en rivière, 2) transfert des prélèvements en rivière vers la molasse à différentes distances de la rivière, 3) réduction de 40 % des prélèvements appliquée « de proche en proche » (rivière seule, rivière + nappe à moins de 50 m, rivière + nappe à moins de 100 m, etc.) et 4) réduction échelonnée suivant la distance à la rivière 	<ul style="list-style-type: none"> - Résultats peu probants (« pas de scénario miracle ») : impact sur le cours d'eau décalé dans le temps mais toujours en période d'étiage pour une distance inférieure à 500 m - Piste à privilégier : report vers la nappe des prélèvements agricoles avec une étude au cas par cas
RMC	Garon (BRL)	<ul style="list-style-type: none"> - Report de la totalité des prélèvements sur la partie amont de la nappe 	<ul style="list-style-type: none"> - Gain minime sur les débits d'étiage
RMC	Est Lyonnais (Burgeap)	<ul style="list-style-type: none"> - Simulations visant à anticiper des situations de crise : 1) baisse des pluies efficaces de 10 %, 2) baisse des Peff de 30 %, 3) Peff - 30 % et réduction des prélèvements de 20 % à partir d'avril et 4) Peff - 30 % et prélèvements - 20 % à partir d'avril et - 50 % de juin à septembre 	<ul style="list-style-type: none"> - si pluies efficaces déficitaires de 10 %, une réduction des prélèvements de 20% à partir d'avril suffit - si pluie efficaces déficitaires de 30 %, une réduction des prélèvements de 20% à partir d'avril suffit

Illustration 32 : Scénarios exploratoires mis en œuvre dans les études consultées

4. Orientations méthodologiques

4.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE

Au regard de la complexité de l'estimation des volumes prélevables et des spécificités de chacun des sites d'étude, il est capital qu'une démarche structurante, et commune aux différentes études, soit suivie. Dans cet objectif, l'illustration 33 rappelle les principales étapes d'une démarche possible lorsque le territoire est soumis à des prélèvements en nappe.

Dans les études consultées, cette démarche a globalement été suivie. En revanche, dans la plupart des cas, certains points ne semblent pas avoir été suffisamment approfondis. On notera pour les principaux : la concertation locale avec la constitution d'un Comité de Pilotage dès le lancement de l'étude, la définition des objectifs environnementaux dont découleront les critères d'objectif, le choix de la méthodologie de travail et enfin les perspectives en termes d'actualisation des volumes prélevables et d'acquisition de données complémentaires.

Dans la suite du chapitre, chacune des étapes est détaillée et accompagnée de préconisations techniques.

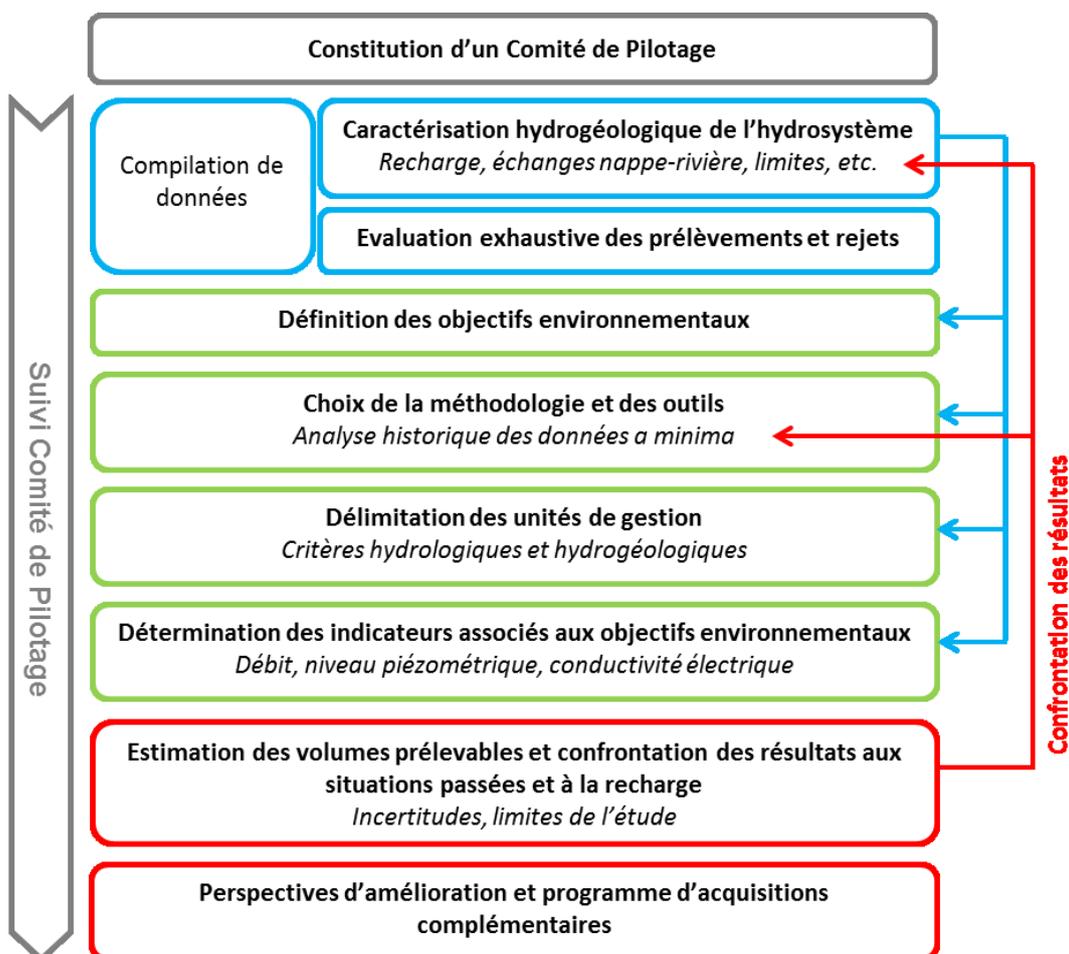


Illustration 33 : Principales étapes qu'il conviendrait de suivre pour une étude d'estimation des volumes prélevables

4.2. CONCERTATION LOCALE

Il est souhaitable qu'un Comité de Pilotage soit constitué en amont de l'étude dans le but de valider les décisions prises en cours d'étude qui pourraient s'écarter des recommandations formulées pour estimer les volumes prélevables. La composition de ce comité dépend du territoire étudié (type d'usages de l'eau, existence ou non d'un SAGE, d'un OUGC, etc).

L'Agence de l'Eau RMC préconise dans son cahier des charges type élaboré en 2009 que le Comité de Pilotage soit composé des organismes suivants :

- Agence de l'Eau
- DREAL
- Service de Police de l'Eau
- Conseil Général
- Conseil Régional
- ONEMA
- Chambre départementale d'Agriculture
- Fédération de pêche
- Chambre de commerce et d'industrie
- Structure de gestion (SAGE, OUGC, ...)
- Représentants des usagers (syndicats AEP, industriels, etc...)

Lors d'un premier retour d'expériences en 2011, le Conseil scientifique du bassin RMC avait mis en avant la nécessité d'associer la profession agricole le plus tôt possible afin d'aboutir à un diagnostic partagé et à une appropriation des résultats de l'étude.

En outre, pour atteindre cet objectif, il est essentiel que le Comité de Pilotage valide les points d'étape suivants : définition des objectifs environnementaux, inventaire des prélèvements, débits et/ou niveaux objectif d'étiage, élaboration de la méthodologie d'estimation des volumes prélevables (analyse historique des données, scénarios à simuler dans le cas d'une modélisation, etc.).

4.3. INVENTAIRE DES PRÉLÈVEMENTS ET REJETS

Tendre vers un inventaire exhaustif des volumes prélevés et des volumes restitués est primordial pour parvenir à une estimation fiable des volumes prélevables. Or, il ressort nettement que la méconnaissance des prélèvements et rejets constitue l'une des principales limites des études réalisées (Cf. § 2.3.1). Une attention toute particulière doit donc être apportée à ce travail d'inventaire.

Le cahier des charges type de l'AERMC est bien détaillé concernant le recensement des prélèvements et rejets (cf. phase 2, § 1.2). Au-delà des informations fournies par les Agences de l'Eau, les DDT, les Services de navigation, les DREAL et les DDPP, il est demandé de conduire plusieurs investigations spécifiques visant à atteindre l'exhaustivité :

- ✓ analyse des besoins en eau en fonction des cultures présentes et du mode d'irrigation sur la base des données du Recensement Général Agricole ; des enquêtes locales peuvent venir compléter ces données ;

- ✓ enquêtes et visites de terrain pour les principaux captages (débit maximal des ouvrages, possibilités de gestion, mise en cohérence des données autorisation / redevances / prélèvements réels, répartition saisonnière, etc.) ;
- ✓ exploitation des études identifiant les préleveurs entre 5000 et 30 000 m³/an commandées par les Agences de l'Eau en 2008, lors de la modification du seuil de redevance prélèvement (de 30 000 à 10 000 m³) ;
- ✓ analyse des transferts inter-bassins ;
- ✓ évaluation des volumes restitués par les stations d'épuration, les industries et les différents types d'irrigation.

Pour les prélèvements domestiques, les mairies pourraient également être consultées. En effet, depuis le 1^{er} janvier 2009, tout particulier utilisant ou souhaitant réaliser un ouvrage de prélèvement d'eau souterraine à des fins d'usage domestique doit déclarer cet ouvrage en mairie.

Afin de répondre à la question des volumes prélevables en période d'étiage, il est primordial d'organiser la collecte des données de prélèvements au pas de temps mensuel. La répartition mensuelle n'étant pas toujours connue, il est impératif de se rapprocher des collectivités territoriales, des Chambres d'agriculture et des Chambres de commerce et d'industries dans le but de disposer des clés de répartition. Si pour l'alimentation en eau potable et l'usage industriel, une clé de répartition identique d'année en année est envisageable, elle sera fortement dépendante des conditions climatiques et des assolements pour l'irrigation.

Par ailleurs, il est important de pouvoir capitaliser le travail d'inventaire mené dans le cadre des études d'estimation des volumes prélevables, notamment par l'alimentation de la Banque Nationale sur les Prélèvements en Eau (BNPE, Cf. Illustration 34). La BNPE est le nouvel outil national dédié aux prélèvements sur la ressource en eau, permettant de fédérer les différentes sources de données (DDT, Agences, DREAL, etc.).

Pour ce faire, comme inscrit au cahier des charges type de l'AERMC, une base de données détaillée des prélèvements doit systématiquement être constituée, au format Sandre (langage commun du Système d'Information sur l'Eau (<http://www.eaufrance.fr/>)). *A minima*, les informations à compiler sont (AERMC, 2009) :

- intitulé du point de prélèvement
- code BSS si ouvrage de prélèvement d'eaux souterraines
- commune (code INSEE et libellé), lieu-dit
- maître d'ouvrage (n° SIREN et libellé)
- coordonnées X et Y du point de prélèvement
- masse d'eau (code et libellé)
- aquifère pour les eaux souterraines (BDLISA)
- usage de l'eau
- volume annuel autorisé
- débit autorisé
- débit de l'équipement
- existence d'un dispositif de comptage

- volume annuel prélevé
- volume mensuel prélevé.

Une restitution cartographique des prélèvements et des rejets apparaît indispensable pour mesurer facilement l'hétérogénéité de leur distribution spatiale. Ce point, rarement discuté dans les études consultées, peut, par exemple, amener à proscrire l'utilisation d'un modèle global.

Toujours dans un objectif de capitalisation, il serait intéressant de faire une analyse des méthodes d'évaluation des prélèvements et rejets non inventoriés (volumes et répartition temporelle) mises en œuvre par les bureaux d'étude pour pallier à l'absence de données. Ce travail serait à conduire par les Agences de l'Eau et des représentants des principaux usagers.

Enfin, il est indispensable que l'inventaire des données de prélèvements et rejets soit analysé du point de vue de son exhaustivité. L'objectif est de mettre en avant les limites du recensement (années à fortes lacunes, secteurs non renseignés, extrapolation de la répartition saisonnière, etc.) et de ce fait le biais introduit dans l'estimation des volumes prélevables.



Illustration 34 : Portail d'accès à la BNPE (<http://www.bnpe.eaufrance.fr>)

4.4. SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE

La caractérisation du contexte hydrogéologique ainsi que la disponibilité de la donnée évaluée à ce stade vont en partie dicter les orientations méthodologiques qui vont suivre, à savoir la définition des objectifs environnementaux, le choix de la méthodologie et des outils, la délimitation des unités de gestion et la détermination des critères d'objectif (Illustration 33 ci-avant).

À l'issue de la synthèse hydrogéologique, il est important de dresser un état des lieux des connaissances et inconnues relatives au fonctionnement de l'hydrosystème.

4.4.1. Modèle conceptuel hydrogéologique

Dans un premier temps, la compilation et l'interprétation des données géologiques et hydrogéologiques doivent permettre d'aboutir à l'élaboration d'un modèle conceptuel de l'hydrosystème étudié. Le niveau de précision de ce dernier sera bien entendu dépendant des données disponibles et des connaissances capitalisées sur le fonctionnement hydrogéologique du système aquifère.

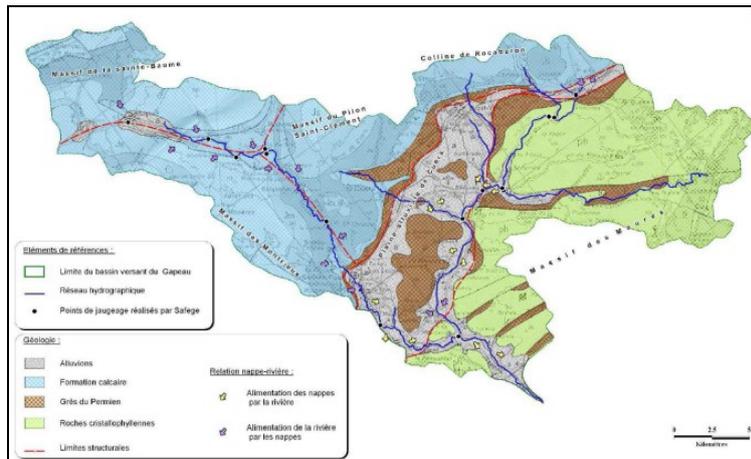
Idéalement, le modèle conceptuel d'écoulement doit être en mesure de définir les extensions horizontale et verticale du système aquifère, la succession des couches géologiques (lithologies et caractéristiques hydrodynamiques), les conditions hydrauliques aux limites, la nature des relations nappe-rivière et les différents flux d'entrée et de sortie (recharge, prélèvements, échanges entre aquifères, etc.).

Des points méthodologiques sont abordés dans la suite du paragraphe pour ce qui concerne la caractérisation des échanges nappe-rivière, le calcul de la recharge et l'intrusion saline pour les aquifères côtiers.

Il est préconisé d'accompagner la description du modèle conceptuel par un ou plusieurs schémas. Trois exemples sont présentés par l'illustration 35.

Le tableau de l'illustration 36 dresse la liste des principales données à collecter dans la mesure de leur disponibilité. La compilation de données sera à adapter à l'échelle de la zone d'étude.

Le cas échéant, un programme d'acquisition de données pourra être proposé à ce stade.



Relations nappe-rivière à l'étiage (SAFEGE ; extrait du rapport Grontmij, 2014)

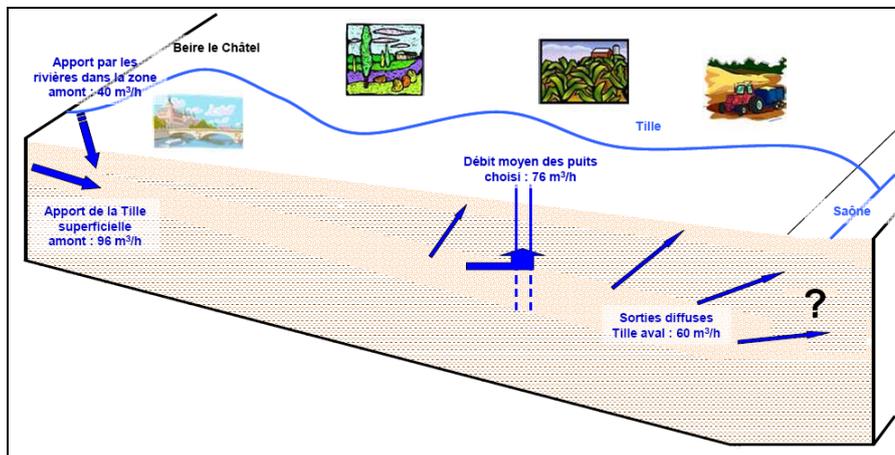
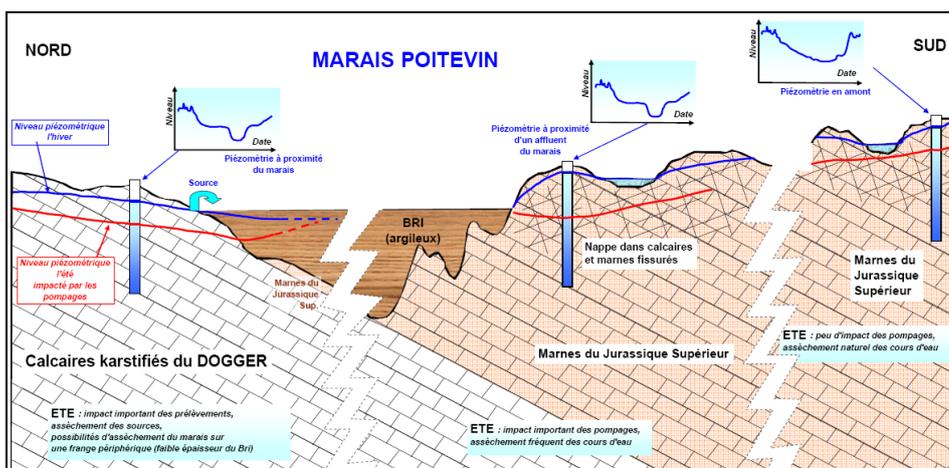


Schéma conceptuel du fonctionnement de la nappe profonde de la Tille (SAFEGE, 2012)



Effets des pompages sur les nappes de bordure du Marais Poitevin (Groupe d'experts, 2007 ; extrait du rapport BRGM, 2010)

Illustration 35 : Exemples de schéma conceptuel hydrogéologique

Thème	Données principales	Sources
GÉOLOGIE	Cadre géologique (stratigraphie, lithologie, limites d'affleurement, structure, ...), investigations géophysiques, coupes géologiques interprétatives, logs géologiques, diagraphies	BRGM Banque du Sous-Sol (BSS) Rapports d'étude
HYDROGÉOLOGIE	Typologie des aquifères (continus/discontinus) et nappe (libre / captive) en jeu Extensions : affleurements, épaisseur, niveaux producteurs, limites (coupes hydrogéologiques) Cartes piézométriques : régionale, locales et synchrones (hautes eaux / basses eaux) Chroniques piézométriques Paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, emmagasinement, porosité) Echanges avec le réseau hydrographique (§ 4.4.2) Zones d'émergence : sources, zone humide Échanges entre aquifères Rôle hydraulique des failles Intrusion saline : logs de conductivité, mesures de conductivité, géophysique (§ 4.4.4)	BDLISA, SIGES, BSS, ADES, Études hydrogéologiques diverses : - synthèses - atlas hydrogéologique - modélisations - pompages d'essai - traçages - etc.
HYDROLOGIE	Chroniques de débit Jaugeages ponctuels	Banque Hydro
HYDRO-CLIMATOLOGIE	Précipitations, ETP Agro-pédologie, réserve utile	Météo France INRA, Chambre d'Agriculture

Illustration 36 : Liste des principales données géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques et hydro-climatiques à collecter

4.4.2. Caractérisation des échanges nappe-rivière

Guides méthodologiques

En ce qui concerne la question cruciale des échanges nappe-rivière, il est recommandé de se rapporter aux deux documents suivants qui présentent différentes méthodes de caractérisation :

- ✓ **Vernoux J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E.** (2010) – Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE. Rapport BRGM/RP-57044-FR.
- ✓ **AE-RMC** (2015) – Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire. Guide méthodologique.

La première synthèse, réalisée par le BRGM pour le compte de l'ONEMA, avait pour objectif de fournir les éléments d'une meilleure prise en compte des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés. Trois thèmes principaux sont abordés :

- relations entre la qualité d'une eau souterraine et la qualité d'une eau de surface, en particulier en période d'étiage ;
- évaluation des échanges quantitatifs entre eau souterraine et eau de surface (débits échangés, contribution des nappes aux débits en étiage, en hautes eaux, lors des crues). Plusieurs outils d'évaluation sont présentés : modèles quantitatifs, modèles de transport, outils géochimiques, outils isotopiques. En ce qui concerne les modèles quantitatifs, des points méthodologiques sont proposés dans la suite du rapport pour les solutions analytiques, les modèles maillés et les modèles globaux ;
- impact des eaux souterraines sur les écosystèmes terrestres associés : impact de l'exploitation sur la qualité biologique d'un cours d'eau, impact des eaux souterraines sur les zones humides.

Dans le guide méthodologique publié par l'Agence de l'Eau RMC, quatre méthodes sont présentées : analyse géomatique fondée sur le calcul de gradients hydrauliques, analyse géochimique (signature isotopique et physico-chimique des eaux), analyse biologique fondée sur la caractérisation des végétaux aquatiques, analyse biologique basée sur l'étude des invertébrés souterrains.

Solutions analytiques

De nombreuses solutions analytiques sont disponibles pour étudier l'impact de pompages en nappe alluviale sur les cours d'eau qui les drainent ou les alimentent. Et même si leurs conditions d'application sont souvent restrictives (hypothèses simplificatrices), elles peuvent permettre, en première approche, de dégager des ordres de grandeur des débits soustraits à la rivière et ainsi orienter l'étude d'estimation des volumes prélevables.

En l'absence d'une modélisation spatialisée, il est préconisé d'utiliser de telles solutions analytiques pour valider les hypothèses retenues, ou au contraire pour appréhender le biais introduit par celles-ci. On citera, par exemple, l'hypothèse, souvent admise dans les études consultées faute de données, et qui consiste à considérer les prélèvements en nappe comme des prélèvements directs en cours d'eau.

Pour aller plus loin, il peut être intéressant d'intégrer les résultats obtenus à partir de solutions analytiques (en termes d'atténuation et de décalage temporel) aux modèles globaux, si ceux-ci s'y prêtent.

Une compilation des solutions analytiques disponibles a été faite par le BRGM en 1976 :

- ✓ **Forkasiewicz J. et Peaudecerf P. (1976)** – Évaluation des débits soustraits à une rivière par un pompage dans un puits riverain. Rapport BRGM 76 SGN 032 AME.

Ces solutions analytiques permettent, pour différentes configurations, de calculer le débit soustrait au cours d'eau à un instant t après le début du pompage (préjudice causé au cours d'eau). Leur utilisation nécessite la connaissance des paramètres hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emmagasinement).

Une dizaine de configurations sont traitées, croisant différents types de contact entre la rivière et l'aquifère (parfait ou berges colmatées, la rivière incise la totalité ou non de l'aquifère), différents types de rivière (longueur finie ou infinie), différents type de nappe (captive, libre, épaisseur uniforme ou non, substratum horizontal ou non, etc.) et différents types de limite (semi-infinie, limite étanche parallèle à la rivière, limite étanche non parallèle).

Des solutions plus complexes ont ultérieurement été développées. On peut, par exemple, citer le modèle de Hunt (2003) relatif à un aquifère multicouche où l'aquitard de surface est en lien avec le cours d'eau (Illustration 37). Ce modèle prend en compte les effets liés au puits de pompage (pertes de charge, effet de capacité de puits, etc.).

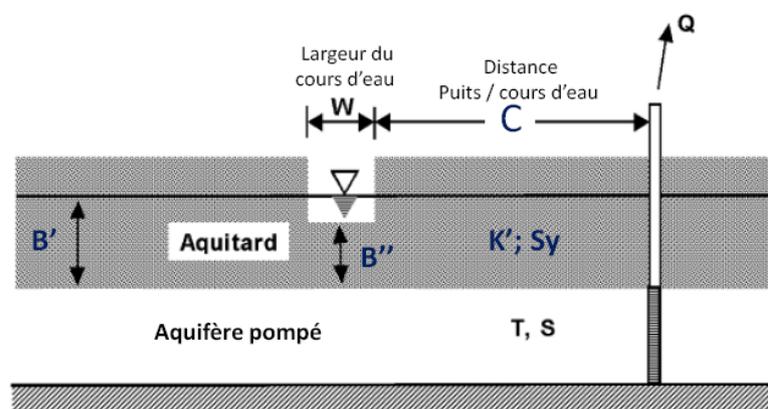


Illustration 37 : Configuration hydrogéologique traitée par le modèle de Hunt (2003) pour l'impact d'un pompage sur le débit du cours d'eau

Il faut noter qu'une des actions de la convention ONEMA-BRGM 2016 concerne l'impact des pompages sur le débit des cours d'eau et les solutions analytiques. Une revue bibliographique est prévue ainsi que l'adaptation de différentes solutions existantes, notamment dans le but de traiter des aquifères multicouches (nappe alluviale sur nappe régionale, aquitard et aquifère sous-jacent) avec différentes conditions aux limites.

Plusieurs outils sont disponibles ; on pourra se reporter à :

- CONEXMIN développé par le BRGM (<http://brgm.conexmin.fr>). Cet outil traite le cas d'un pompage dans une nappe alluviale dans trois configurations géométriques simples (nappe semi-infinie, limite étanche parallèle au cours d'eau, puits situé entre deux rivières). CONEXMIN permet de calculer le volume soutiré à la rivière en fonction des caractéristiques de la nappe alluviale, de la distance du puits à la rivière, du temps de pompage et du débit du puits (Cf. exemple de restitution graphique, Illustration 38) ;
- STRMDEPL08 développé par l'USGS : (<http://mi.water.usgs.gov/software/groundwater/strmdepl08/>).
Quatre solutions analytiques sont implémentées : 1) et 2) le cours d'eau incise entièrement l'aquifère alluvial avec colmatage ou non des berges, 3) pénétration partielle du cours d'eau avec colmatage des berges et 4) le cours d'eau incise un aquitard avec pompage dans l'aquifère sous-jacent (Hunt, 2003 ; Illustration 37 ci-avant).

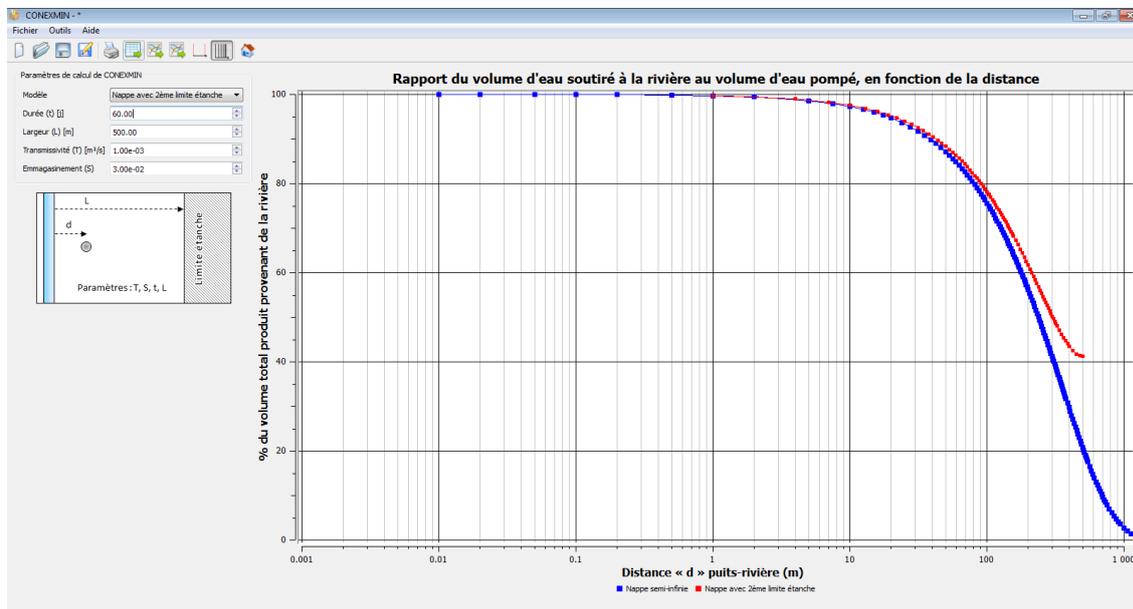


Illustration 38 : Restitution graphique proposée par le logiciel CONEXMIN (<http://brgm.conexmin.fr>)

4.4.3. Bilan hydrologique et calcul de la recharge

En préambule, il convient de rappeler que l'estimation de la recharge d'un aquifère ne détermine pas directement son niveau d'exploitation durable. Il s'agit avant tout de mesurer la réponse dynamique de l'hydrosystème aux prélèvements : quel est l'impact acceptable sur la vidange de l'aquifère (conditions aux limites) ? Ce principe, démontré par Theis (1940), a été repris plus récemment par Bredehoeft (2002) constatant que le « mythe de la recharge » restait ancré dans la communauté des hydrogéologues : « *c'est cette nécessité de comprendre la dynamique des écoulements souterrains qui a conduit les hydrogéologues à modéliser les hydrosystèmes* ».

Ce principe essentiel est bien en accord avec la « ressource disponible » définie par la DCE (Cf. § 1.1.2).

Ceci étant dit, la recharge est l'un des paramètres clés du bilan hydrologique et, elle peut représenter un guide précieux dans l'estimation des volumes prélevables, en particulier pour les aquifères à nappe libre, objet de la présente étude. Pour les nappes alluviales, les échanges nappe-rivière ainsi que les apports par les aquifères de versant et/ou sous-jacents resteront cependant prépondérants dans l'estimation des volumes prélevables.

Parmi les études consultées n'ayant pas eu recours à une modélisation spatialisée, il est constaté que peu s'intéressent à l'évaluation du flux de recharge.

L'estimation de la recharge est un problème complexe dépendant de nombreux facteurs : météorologie, pédologie, couverture végétale, géomorphologie (pente, rugosité, ...) et propriétés hydrodynamiques des formations géologiques en jeu.

Deux études récentes sur le sujet ont été réalisées par le BRGM, auxquelles il est fortement recommandé de se reporter pour une présentation détaillée et une analyse des différentes méthodes de calcul existantes :

- ✓ **Caballero Y., Lanini S., Seguin J.-J., Charlier J.-B. et Ollivier C. (2015)** – Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse.
- ✓ **Seguin J.-J. (2016)** – Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines.

La première étude, commanditée par l'Agence de l'Eau RMC, a notamment permis d'aboutir à la conception de l'outil ESPERE, développé sous MS Excel©. Une mise à disposition gratuite est possible sur simple demande à l'adresse suivante : espere@brgm.fr.

La feuille de calcul permet de mettre en œuvre rapidement et simultanément une dizaine de méthodes d'estimation de la recharge ou de la pluie efficace, au choix de l'utilisateur : méthodes empiriques ou de bilan exploitant les données météorologiques journalières, méthodes de filtre des chroniques de débits et méthode d'analyse des variations piézométriques (Cf. page d'accueil, Illustration 39).

Estimation de la Pluie Efficace et de la REcharge selon différentes méthodes

Mode d'emploi

1) Si vous souhaitez utiliser des nouvelles données : initialisez la feuille de calcul en cliquant sur le bouton ci-contre puis collez les nouvelles données journalières dans l'onglet "Données" Nettoyer les données

2) Cochez les méthodes qui doivent être appliquées sur les données, et renseignez les paramètres du tableau ci-dessous

3) Cochez la case ci-contre si vous souhaitez que les résultats soient exprimés par années hydrologiques plutôt que par années civiles Année hydrologique

4) Lancez les calculs en cliquant sur le bouton "lancer les calculs"

5) Lorsque les calculs sont terminés, vous pouvez enregistrer la simulation réalisée en cliquant sur le bouton "Sauvegarder".

Propriétés	Unité	Valeur	Remarques
Surface de l'impluvium	km ²		Pour transformer la pluie efficace en volume infiltré (méthodes de bilan et Turc) et le débit de base en recharge
Ratio Infiltration / Pluie efficace			Pour transformer la pluie efficace en recharge (méthodes de bilan et Turc). Vaut 0 si toute la pluie efficace ruisselle, vaut 1 si toute la pluie efficace s'infiltré.
Stock maximal dans le sol (mm)	mm		Paramètre nécessaire pour les méthodes de Thornthwaite et Dingman (RUmax)
Latitude	°		Paramètre nécessaire pour la méthode de Dingman - Hamon
Porosité efficace aquifère libre (Sy)			Paramètre nécessaire pour la méthode Water Table Fluctuation
Surface du bassin hydrogéologique	km ²		Surface à considérer pour convertir la recharge calculée par WTF en volume infiltré

Paramètres spécifiques

Végétation

Prise en compte du couvert végétal pour le calcul de l'ETR. Pour activer cette option et définir les paramètres, cliquer ici

BFI - Filtre Chapman&Maxwell ou Eckardt

BFImax		Valeurs indicatives pour BFImax (d'après Eckardt, 2005) : BFImax=1 : débit de source ; BFImax=0.8 : cours d'eau pérenne en milieu sédimentaire BFImax=0.5 : petit cours d'eau en milieu sédimentaire ; BFImax=0.25 en domaine de socle
k (constante de recession, comprise entre 0 et 1)		

Lancer les calculs

Prêt pour un nouveau calcul

Sauvegarder la simulation

©BRGM/D3E/SL - 2015 - ESPERE version 1.52
Contact : espere@brgm.fr

Illustration 39 : Page d'accueil de l'outil ESPERE

Suite aux tests de performance conduits par le BRGM, les méthodes visant à calculer l'écoulement de base du cours d'eau, peu usitées en France, méritent d'être mises en avant de par leur fiabilité et leur mise en œuvre relativement simple (Seguin, 2016). L'écoulement de base (ou débit de base) d'un cours d'eau est la part du débit de ce cours d'eau qui provient du ou des aquifères qui lui sont hydrauliquement connectés.

Ces méthodes utilisent le concept de « *baseflow index* » (BFI), décrit dans les deux rapports précités. Une méthode de calcul du BFI est implémentée dans l'outil ESPERE. Le Base Flow Index (BFI) est le rapport entre le débit de base d'un cours d'eau et le débit total **calculé sur sur une longue période**. Il a été développé au début des années 1980 en Angleterre (Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford).

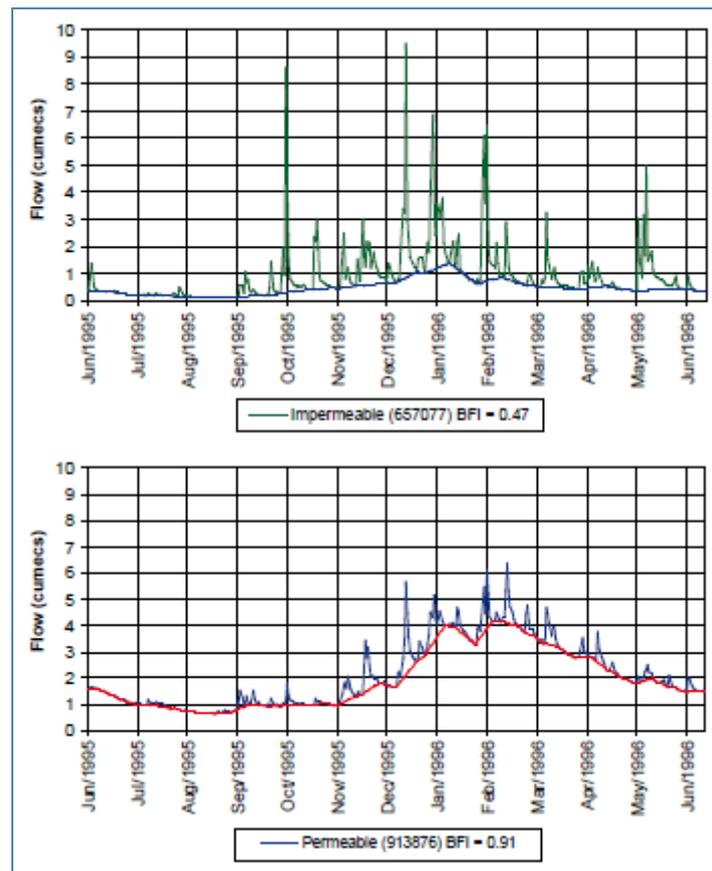


Illustration 40 : Exemple de décomposition d'hydrogrammes dans deux bassins de caractéristiques différentes et valeurs correspondantes du BFI (extrait du rapport BRGM/RP—FR, source : Gustard et al., 2009)

4.4.4. Problématique de l'intrusion saline

Pour les aquifères côtiers, sensibles à l'intrusion saline, il est essentiel comprendre les mécanismes d'une éventuelle salinisation des eaux souterraines, en lien avec les prélèvements, la recharge et les écoulements (niveau marin, gradient hydraulique, cours d'eau, etc.).

La compréhension fine des processus exige une acquisition en continu de la qualité des eaux prélevées au droit des forages d'exploitation (paramètres chlorures, conductivité et volumes prélevés), un réseau de surveillance avec mesure en continu de la charge hydraulique et de la conductivité (à différentes profondeurs si possible).

Pour la mesure de la conductivité en piézomètre, il est préconisé de procéder à la réalisation périodique de logs de conductivité⁷ en condition naturelle (sans pompage). Cet outil, relativement simple à mettre en œuvre, s'avère, en effet, plus performant qu'une mesure en surface après prélèvement où les conditions d'échantillonnage ne sont pas toujours identiques d'une campagne à l'autre. Les logs de conductivité permettent notamment d'appréhender la

⁷ Mesure de la conductivité électrique de l'eau sur la verticale (diagraphie)

géométrie de la zone d'interface entre l'eau douce et l'eau salée. Cette information est particulièrement précieuse si des travaux de modélisation sont envisagés.

Un tel réseau de surveillance a été mis en place par l'Office de l'Eau de la Réunion depuis de nombreuses années, avec la réalisation de 2 à 4 logs par an et par piézomètre. Le BRGM, chargé de la compilation des données, a pu mettre en évidence sur certains secteurs l'impact de l'exploitation des eaux souterraines sur la remontée de l'interface eau douce / eau salée (Aunay et al., 2011 ; Petit et al., 2012).

Un exemple de compilation des logs de conductivité est montré par l'illustration 41. Le graphique supérieur présente la moyenne annuelle des conductivités tandis que le graphique inférieur représente les valeurs associées à chaque log de conductivité effectué. La zone de transition entre eau douce et eau salée est visible vers 65-70 m de profondeur ; une contamination de l'aquifère est clairement constaté à partir de 1999.

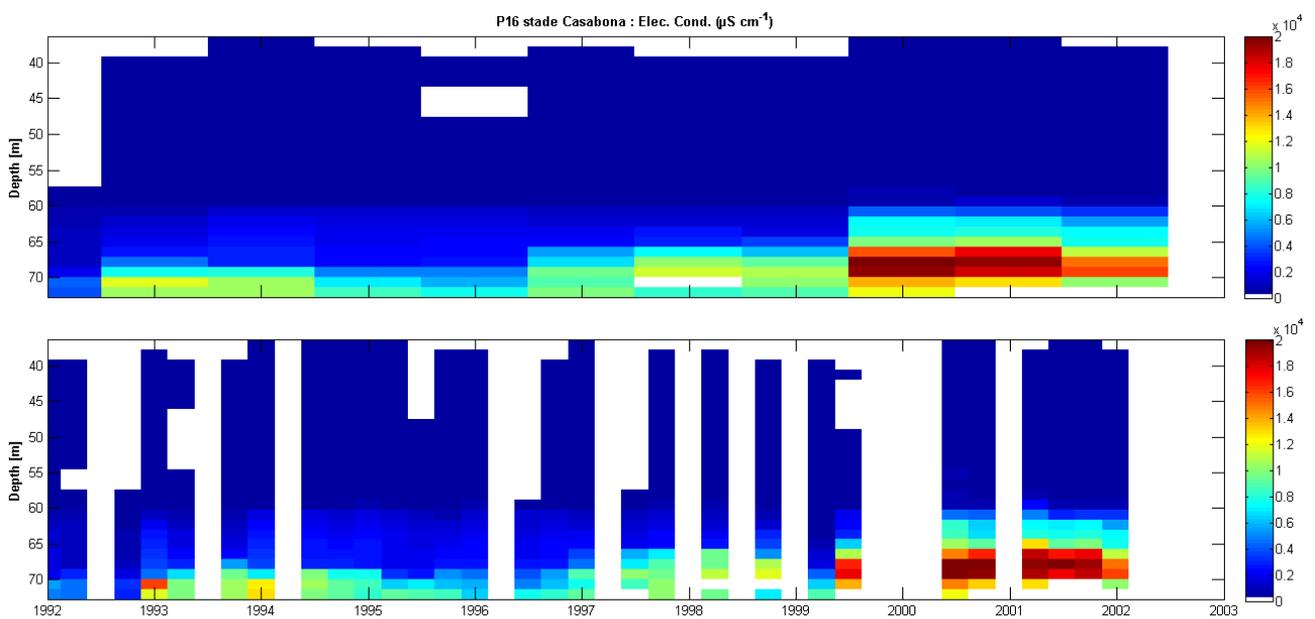


Illustration 41 : Évolution de la conductivité en fonction de la profondeur et au cours du temps au droit d'un piézomètre à la Réunion (source : Charlier, Ladouche, Aunay, publication en cours)

Des corrélations sont à rechercher entre les valeurs de la conductivité, des prélèvements, de la pluviométrie et des niveaux piézométriques. Pour ce faire, il est important que les conditions hydrauliques au moment des mesures soient maîtrisées, en particulier l'état de la marée.

4.5. OBJECTIFS ENVIRONNEMENTAUX ET INDICATEURS DE GESTION

4.5.1. Objectifs environnementaux

La définition des objectifs environnementaux n'est pas du ressort du bureau d'études en charge de l'étude EVP. Elle doit être validée par le Comité de Pilotage, en amont de l'étude.

Pour la gestion des prélèvements en eau souterraine, quatre types d'objectifs environnementaux peuvent être distingués et coexister, en correspondance avec les objectifs définis par la DCE pour l'évaluation du bon état quantitatif d'une masse d'eau souterraine :

- veiller à respecter un équilibre sur le long terme entre les volumes s'écoulant au profit des autres milieux ou d'autres nappes, les volumes captés et la recharge de l'aquifère (Cf. § 4.4.3) ;
- éviter une altération significative de l'état chimique et/ou écologique des eaux de surface liée à une baisse d'origine anthropique du niveau piézométrique ;
- éviter une dégradation significative des écosystèmes terrestres dépendants des eaux souterraines en relation avec une baisse du niveau piézométrique : non inversion des flux des nappes vers une zone humide par exemple ;
- empêcher toute invasion saline ou autre liée à une modification d'origine anthropique des écoulements.

Ces différents objectifs environnementaux ont été rencontrés dans les études consultées.

Les critères d'objectif qui en découlent pourront être proposés par le bureau d'études, en revanche, une validation par le Comité de Pilotage reste une nouvelle fois indispensable.

Enfin, il est rappelé que la Circulaire du 30 juin 2008, introduit une notion fréquentielle fixant une borne au volume prélevable qui doit être tel qu'il permette de respecter statistiquement 8 années sur 10 les objectifs environnementaux identifiés.

4.5.2. Critères d'objectif

Les critères d'objectif utilisés dans les études consultées sont rapportés au niveau du tableau récapitulatif de l'Annexe 1.

Le plus souvent, les objectifs environnementaux sont directement traduits par le respect de débits ou niveaux piézométriques d'objectif. Deux cas de figure peuvent se présenter au démarrage d'une étude EVP :

- 1) **Utilisation des débits et niveaux d'objectif d'ores et déjà existants sur le territoire de l'étude.** Il peut être ici question :
 - de Débit d'Objectif d'Étiage (DOE) ou de Piézométrie d'Objectif d'Étiage (POE) inscrits dans les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) ou dans les Arrêtés Préfectoraux ;
 - des Débits Biologiques (DB) déterminés au niveau de stations habitat. Ceux-ci sont souvent établis en prévision de l'étude EVP.
- 2) **Définition des critères d'objectif dans le cadre de l'étude EVP.** Dans ce cas de figure, il est intéressant de souligner qu'il ne s'agit pas toujours de débits ou de niveaux objectif. Trois approches, discutées et validées en Comité de Pilotage, ont retenu notre attention :
 - limiter à 30 % l'impact des prélèvements sur le QMNA5 naturel (Plaine de Caen, BRGM, 2014a) ;

- limiter les assecs du cours d'eau en termes de durée et d'étendue (nappes alluviales Giscle et Môle, Artelia, 2015). Sur cette base, des indicateurs piézométriques ont ensuite été déterminés à l'aide du modèle hydrodynamique ;
- définir une valeur seuil de la conductivité en complément des niveaux piézométriques d'alerte (Alluvions du Gapeau, Grontmij, 2014). Dans le cas des aquifères sensibles à l'intrusion marine, l'indicateur piézométrique seul peut effectivement ne pas être suffisant, la chimie des eaux et/ou la conductivité doivent alors être analysées en complément (absence de corrélation entre la piézométrie et la chimie/conductivité).

Dans le premier cas de figure, une analyse critique des indicateurs existants doit être conduite afin de vérifier leur adéquation avec une étude d'estimation des volumes prélevables (objectifs poursuivis lors de leur détermination, méthodes de calcul, etc.). Si les DOE et POE sont cohérents avec les objectifs poursuivis par la Circulaire du 30 juin 2008, ce n'est par exemple pas le cas des débits de crise (DCR⁸) et niveaux piézométriques de crise.

Pour les DOE inscrits dans les SDAGE, différents modes de calcul sont utilisés (QMNA5, VCN30, etc.). Suivant le mode de calcul retenu, l'estimation des volumes prélevables sera plus ou moins contrainte. Il est donc essentiel de rappeler la définition des débits et niveaux de référence utilisés.

Dans le même ordre d'idée, il aurait été souhaitable, pour quelques études, que d'autres critères d'objectif fussent utilisés lorsque les DB s'avéraient inexploitable (dépassements trop réguliers) ou trop incertains au droit des stations de mesure modélisées (extrapolés à partir des stations habitat distantes).

Dans le but d'appréhender la sensibilité des volumes prélevables aux débits d'objectif, il pourrait être intéressant, dans la mesure des données disponibles, de tester différents seuils caractéristiques (DB, QMNA5_{naturel}, QMNA5_{influencé}, etc.). À ce titre, une réflexion a été menée sur le bassin RMC comparant l'utilisation du DB, du QMNA5 et du QM5⁹. En Rhône Alpes, lorsque le QM5 pouvait être estimé, son utilisation a été privilégiée (moins contraignant que le QMNA5)

Si une gestion intégrée des différentes unités de gestion d'un même aquifère ou d'un même bassin versant est souhaitée, il est indispensable que le même critère d'objectif soit utilisé pour toutes les unités (nous avons vu précédemment que ce n'était pas toujours le cas).

Enfin, pour ce qui concerne la détermination des indicateurs piézométriques, il est recommandé de se reporter aux deux guides méthodologiques élaborés par le BRGM pour le compte de l'ONEMA :

- ✓ **Seguin J.-J.** (2009) – Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes. Orientations méthodologiques. Rapport BRGM/RP-58139-FR.

⁸ Valeur de débit d'étiage au-dessous de laquelle l'alimentation en eau potable pour les besoins indispensables à la vie humaine et animale, ainsi que la survie des espèces présentes dans le milieu sont mises en péril. À ce niveau d'étiage, toutes les mesures possibles de restriction des consommations et des rejets doivent avoir été mises en œuvre (plan de crise) (source : www.eaufrance.fr)

⁹ Débit mensuel moyen de période de retour 5 ans

- ✓ **Stollsteiner P.** (2011) – Guide pour la détermination des indicateurs piézométriques en vue d'une gestion quantitative de la ressource. Rapport BRGM/RP-61374-FR.

4.6. CHOIX DES MÉTHODES ET OUTILS

4.6.1. Analyse de l'historique des données

Comme illustré par plusieurs cas d'étude (§ 3.1), il est tout d'abord important de rappeler que le recours à un outil de modélisation n'est pas systématique. Une analyse, plus ou moins élaborée, des chroniques de données disponibles (pluie, ETP, débits, niveaux piézométriques, volumes prélevés, conductivité électrique de l'eau) peut permettre une première évaluation des volumes prélevables au regard de situations historiques.

Cette approche apparaît particulièrement adaptée aux hydrosystèmes connaissant ou ayant connu une exploitation intensive ; il est alors, en effet, possible de proposer de manière pragmatique une borne supérieure aux volumes prélevables par une analyse croisée des données historiques (Cf. nappes alluviales du Gapeau et de l'Argens ; § 3.1.1 et § 3.1.2).

Même si il n'est pas garanti que l'analyse historique aboutisse à la détermination des volumes prélevables, celle-ci doit être considérée comme une étape indispensable et préliminaire à toute autre méthodologie (Cf. Illustration 33). Elle permet, en effet, de dresser un premier bilan des données disponibles, d'appréhender le fonctionnement de l'aquifère en condition de pompage et *in fine* de préparer et d'orienter la suite de l'étude.

Pourtant, dans de nombreuses études, cet examen des données et situations historiques ne transparait pas.

En première approche, deux analyses sont à conduire : 1) analyse statistique des séries de pluie (et/ou pluie efficace, recharge) et 2) recherche de corrélations entre prélèvements, niveaux, débits, précipitations et, éventuellement, conductivité.

En fonction de la quantité de données disponibles et des corrélations mises en évidence, des méthodologies plus élaborées peuvent être envisagées avec la définition d'indicateurs de gestion ou encore la construction d'abaques (Cf. exemple de l'étude Sud Vendée où une relation linéaire entre niveaux piézométriques et volumes prélevés est démontrée pour les années non influencées par les précipitations, § 3.1.4).

Par ailleurs, au regard des incertitudes associées à l'évaluation des volumes prélevables, il sera toujours bénéfique de confronter les résultats d'une modélisation aux résultats issus de l'analyse de situations historiques.

4.6.2. Choix des outils de modélisation

Les modèles spatialisés représentent l'approche de modélisation la plus complète pour rendre compte d'une réalité complexe et offrent donc la plus grande gamme de possibilités.

Pour **les modèles globaux**, sont distingués **les modèles de type conceptuel** utilisant un concept physique simplificateur pour représenter l'hydrosystème (par exemple un assemblage de réservoirs en liaison hydraulique les uns avec les autres) et **les modèles de type boîte noire** mettant en relation une sortie du système étudié (niveau, débit) avec une ou plusieurs entrées (pluie, ETP) *via* une ou plusieurs fonctions de transfert.

Contrairement à un modèle maillé, une modélisation globale ne permettra donc pas d'établir de différenciations spatiales, par exemple une zone à forte concentrations de pompages par rapport à une autre où la densité est plus faible, secteur aquifère plus productif qu'un autre, zone de forte infiltration, définition de plans de gestion avec une configuration spatiale optimale de prélèvements, ... (Seguin et Thiéry, 2008).

Les modèles globaux n'étant ni spatialisés ni descriptifs du milieu physique, ils nécessitent moins de données que les modèles maillés (précipitations, ETP, niveaux piézométriques, débits) et présentent l'avantage d'une mise en œuvre rapide et de temps de calculs brefs.

Aussi, au-delà des conditions d'applications des différents outils, le choix du modèle sera dicté par les données disponibles, le délai et le budget de l'étude. Un arbre de décision est proposé à l'illustration 42 pour aider le gestionnaire à choisir entre modèle maillé et modèle global.

D'un point de vue hydrogéologique, le choix du modèle maillé s'impose lorsqu'on s'intéresse aux systèmes aquifères sédimentaires (milieux poreux), à nappes libres et captives, potentiellement multicouches avec des échanges par drainance descendante et/ou ascendante. En revanche, ils ne sont en général pas adaptés à la représentation des milieux fortement discontinus : aquifères fissurés en domaine de socle et karstiques.

Pour les milieux karstiques, certains logiciels offrent la possibilité d'introduire des drains karstiques, mais la configuration réelle du réseau karstique n'est que rarement connue.

Le modèle global sera préféré au modèle spatialisé pour l'étude des aquifères discontinus puisque ce type de modèle permet de représenter l'hydrosystème comme un tout, indépendamment de sa structure interne.

Enfin, du point de vue de la gestion de la ressource en eau, un modèle global n'est pas adapté à la recherche d'une configuration optimale de prélèvements permettant de respecter un certain nombre de contraintes.

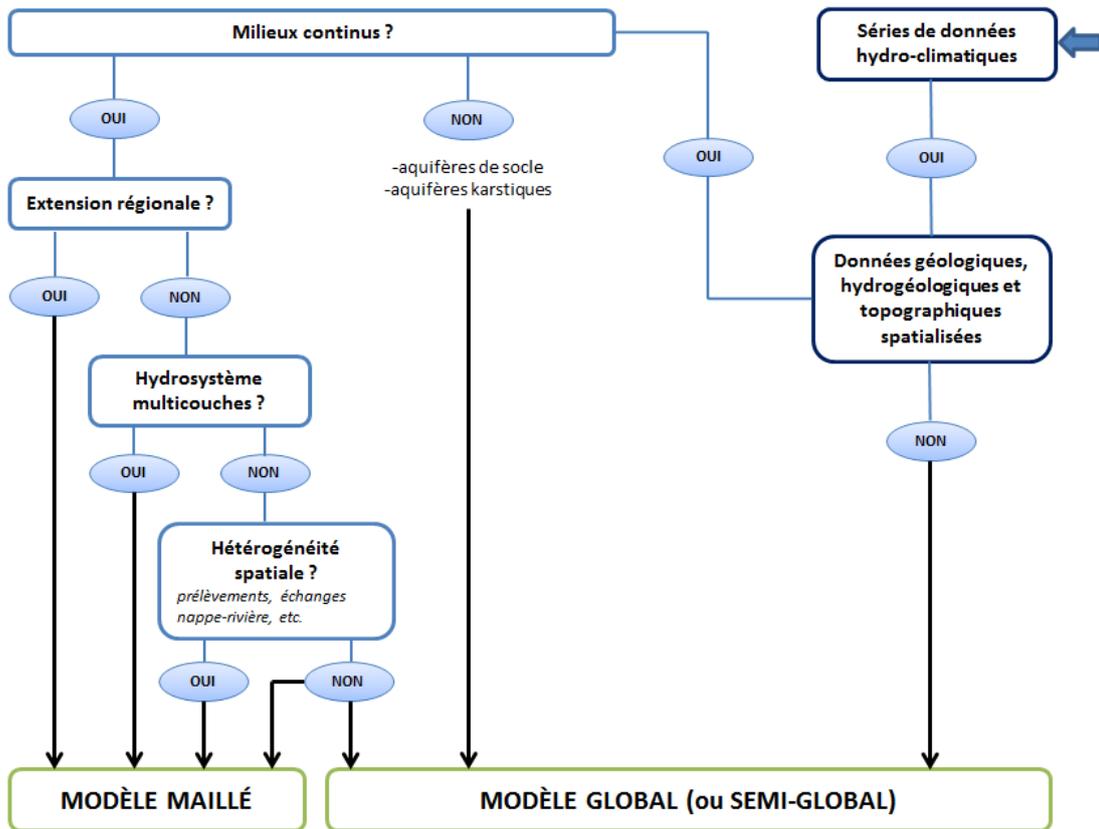


Illustration 42 : Arbre de décision pour le choix des outils de modélisation (à croiser également avec les ressources disponibles pour faire l'étude)

4.7. PRÉCONISATIONS RELATIVES À L'UTILISATION DES MODÈLES MAILLÉS

Le présent paragraphe reprend les lignes directrices du rapport BRGM rédigé pour le compte de l'ONEMA : *Modélisation maillée des écoulements souterrains. Principes, démarche et recommandations* (Barthélémy et Seguin, 2016). Pour plus de précisions, il est donc conseillé de se reporter directement au guide méthodologique.

4.7.1. Recommandations générales

Les grandes étapes à suivre pour une modélisation hydrogéologique sont les suivantes :

- définition de(s) objectif(s) poursuivis par l'élaboration d'un modèle maillé, ils vont conditionner les spécificités du modèle à mettre en œuvre (extension, couplage réseau hydrographique, etc.) ;
- synthèse hydrogéologique et collecte des données nécessaires à la modélisation : géométrie des couches géologique, paramètres hydrodynamiques, données climatiques, prélèvements, piézométrie (chroniques et cartes), débits, caractérisation du réseau hydrographique, etc. Pour plus de détails concernant ce préalable particulièrement important, on se reportera au chapitre 5 du rapport précité ;
- construction d'un modèle géologique 3D dont l'adéquation avec la modélisation hydrogéologique à suivre est bien entendu primordiale ;

- construction du modèle d'écoulement (maillage, structure et géométrie du système, propriétés hydrogéologiques, conditions aux limites et entrées/sorties hydrauliques) ;
- calage du modèle sur une période suffisamment longue pour couvrir des situations hydrologiques contrastées ;
- validation du modèle. Elle consiste à simuler avec le modèle calé une période volontairement mise de côté pendant le calage afin de juger de sa représentativité ;
- exploitation du modèle calé.

Lorsque le modèle a été développé antérieurement à l'étude, il faudra vérifier son adéquation avec la question des volumes prélevables. L'expertise du modèle doit, par ailleurs, permettre de mettre en avant les réserves d'usage et limites associées aux volumes déterminés. Le cas échéant, des adaptations pourront être nécessaires.

4.7.2. Préconisations relatives aux études EVP

Extension du modèle et conditions aux limites

Idéalement, les limites du modèle doivent coïncider avec les limites naturelles du système aquifère modélisé. En pratique, cela n'est pas toujours possible en raison de limites parfois très éloignées, de l'absence de connaissance sur certains secteurs ou encore d'un budget insuffisant. Il faudra alors veiller au respect des deux critères suivants :

- les limites « artificielles » retenues doivent être situées au-delà de la zone d'influence des différents pompages considérés par l'étude EVP. En première approche, des solutions analytiques (formules de Theis ou Jacob par exemple) permettent d'évaluer ce rayon d'influence ;
- les conditions hydrauliques assignées aux limites « artificielles » doivent permettre de restituer au mieux l'influence de la zone non modélisée. C'est pourquoi, les limites à flux nuls et les conditions de type échanges nappe-rivière doivent être privilégiées, par rapport aux limites à charges et flux imposés.

Dans le cas d'une nappe alluviale en relation avec des aquifères encaissants, l'ensemble de l'hydrosystème devra, dans la mesure du possible, être modélisé (modèle multi-couches).

Faute de données disponibles, ce n'est pas toujours possible, aussi, des contrôles doivent être effectués pendant les différentes étapes de calage et d'exploitation du modèle pour s'assurer que les limites du modèle restent appropriées. Le cas échéant, le biais apporté par la proximité d'une limite « artificielle » à une zone de prélèvement sera mis en évidence et devra être discuté.

Modélisation explicite du réseau hydrographique

Afin de répondre à la question des volumes prélevables, et dans le cas de nappes connectées aux eaux superficielles (cours d'eau, canaux, zones humides), il est indispensable de recourir à un logiciel de modélisation permettant de coupler de façon explicite hydrodynamique et réseau hydrographique. Les volumes prélevables pourront ainsi être déterminés sur la base du respect de débits objectifs d'étiage.

Pour chacune des mailles rivière, les propriétés hydrogéologiques de la zone d'échange entre le cours d'eau et l'aquifère sous-jacent doivent alors être décrites : largeur et longueur du lit de la rivière, épaisseur et perméabilité de colmatage, cote du fil d'eau. Des mesures de terrain sont fortement préconisées pour décrire *a minima* le réseau hydrographique : campagnes de jaugeages, réalisation de profils en travers à intervalle régulier (mesure de la largeur du tronçon, des cotes du fond de rivière et du fil d'eau).

Cette approche permet un double calage hydrodynamique, à la fois sur les chroniques piézométriques et sur les débits enregistrés aux stations hydrométriques.

L'épaisseur et la perméabilité de colmatage, rarement connus, deviennent alors des paramètres de calage.

Au droit du réseau hydrographique modélisé, un maillage fin peut s'avérer nécessaire dans le cas des vallées étroites ou en présence de gradient hydraulique important.

Calage du modèle et validation

Dans le cadre de l'estimation des volumes prélevables, le calage du modèle sera ciblé sur les périodes d'étiage.

La durée de la période de calage peut être adaptée en fonction de l'inertie de l'hydrosystème mais il est préconisé d'utiliser toutes les données observées disponibles avec une répartition indicative de $\frac{3}{4}$ pour le calage et $\frac{1}{4}$ pour la validation.

Enfin, une distribution raisonnée des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement doit être privilégiée, c'est-à-dire à la fois homogène et conforme aux données de terrain. Une distribution par plages homogènes est en général préférable à des mosaïques contrastées qui permettront peut-être une meilleure retranscription des débits et niveaux observés mais qui sont susceptibles de dégrader la robustesse des simulations visant à évaluer les volumes prélevables.

Dans le même ordre d'idée, les valeurs non réalistes affectées localement pour reproduire artificiellement un état piézométrique en phase de calage seront préjudiciables en phase d'exploitation, où des conditions de pompage différentes seront testées.

Pas de temps

Quel que soit le pas de temps utilisé pour les simulations hydrodynamiques, il est recommandé d'effectuer les calculs hydroclimatiques permettant d'élaborer les chroniques de recharge à un pas de temps inférieur ou égal à 10 jours. Dans l'idéal, au pas journalier, surtout en climat méditerranéen où les épisodes pluvieux sont brefs et intenses, l'évapotranspiration potentielle élevée. À défaut, un pas de temps pentadaire (5 j) voire décadaire (10 j) peut convenir en climat océanique. En revanche, un pas mensuel est à proscrire car il peut conduire à sous-estimer significativement la recharge.

En fonction de l'inertie du système, le pas de temps des calculs hydrodynamiques pourra éventuellement être plus grand (mensuel). Avec certains logiciels, il est également possible de recourir à des pas de temps variables. Par exemple, le modèle du Jurassique du Poitou Charentes fonctionne avec un pas de temps hebdomadaire pendant la période d'irrigation et avec un pas de temps mensuel hors de cette période. Cette souplesse permet de ne pas trop alourdir les temps de calcul.

Analyses de sensibilité

Plusieurs paramètres de calage n'étant pas connus avec une grande précision, il est important d'étudier la sensibilité des volumes prélevables déterminés à la variabilité de ces paramètres.

L'analyse de sensibilité pourra être ciblée sur les paramètres les moins connus. Par exemple, dans le cas d'une modélisation explicite des cours d'eau, il semble important de tester la sensibilité du modèle à la variation de la perméabilité et de l'épaisseur de colmatage.

Au-delà de contribuer significativement à améliorer la connaissance du système aquifère étudié, cette opération permet de tester la représentativité du modèle et de cerner les incertitudes associées aux volumes prélevables calculés.

Validation de la simulation en condition non influencée

Comme vu au chapitre précédent, dans de nombreuses études, un scénario de référence sans prélèvement est simulé. En phase de validation du modèle, cette simulation en condition non influencée est fortement recommandée puisqu'elle va permettre de s'assurer que le modèle calcule un état piézométrique réaliste où les sources coulent à des débits plausibles et la nappe ne déborde pas dans des secteurs où aucune source ou zone humide n'était connue antérieurement.

Documentation et actualisation du modèle

Il est important de prévoir de mettre à disposition la documentation liée à la construction et au calage du modèle hydrodynamique. Un sommaire type d'un rapport descriptif d'une modélisation hydrogéologique maillée est proposé par Barthélémy et Seguin (2015).

De plus, des mises à jour périodiques d'un modèle maillé peuvent être nécessaires ; ces dernières constituant autant d'étapes de validation. Elles déclenchent souvent des révisions de calage qui concourent au renforcement progressif de la représentativité et de la robustesse du modèle et de fait de l'évaluation des volumes prélevables.

4.7.3. Stratégies de simulation à privilégier

En phase d'exploitation du modèle, la détermination des volumes prélevables est effectuée *via* des simulations dites prospectives croisant un ou des scénarios climatiques et différents scénarios de prélèvement.

Le scénario climatique modélisé peut permettre de considérer la notion fréquentielle introduite par la Circulaire du 30 juin 2008 (respecter statistiquement 8 années sur 10 les objectifs environnementaux identifiés, Cf. § 1.1.1).

En tout état de cause, pour le scénario climatique, il est recommandé de privilégier l'exploitation des séries climatiques observées plutôt que la construction de séries fictives issues d'un traitement statistique. Parmi les approches rencontrées (§ 3.3), deux semblent particulièrement intéressantes :

- si la période modélisée est longue, la simulation prospective peut alors être conduite sur la totalité des séries climatiques observées utilisées pour le calage et la validation du modèle. Plus la durée modélisée sera longue, plus l'évaluation sera robuste (exemples :

modèles de la Plaine de Caen, de la nappe alluviale du Garon, de Dijon Sud ...). Il n'est alors pas nécessaire de procéder à la construction d'un scénario climatique ;

- si la période modélisée est relativement courte mais qu'une longue série de pluie est disponible, l'analyse statistique des pluies permettra d'identifier des années de référence (années moyennes et années quinquennales sèches) puis de construire par assemblage une chronique alternant années moyennes et années sèches (exemples : modèles de l'Est Lyonnais, de l'Ariège).

La détermination des volumes prélevables pourra ensuite se faire par essai-erreur à partir de la simulation de différents scénarios de prélèvement.

Enfin, en complément des simulations prospectives, il apparaît indispensable de procéder à des simulations dites exploratoires afin de tendre vers une gestion optimale de la ressource en eau. Cette approche a été discutée au § 3.4.2 ; plusieurs exemples sont présentés.

Les simulations prospectives comme exploratoires doivent être discutées en Comité de Pilotage.

4.8. PRÉCONISATIONS RELATIVES À L'UTILISATION DES MODÈLES GLOBAUX (ET SEMI-GLOBAUX)

Si la synthèse hydrogéologique et la collecte de données mettent en évidence une forte hétérogénéité spatiale de l'hydrosystème à modéliser, l'utilisation d'un modèle semi-distribué pourra être privilégiée.

Pour un modèle semi-global, la zone d'étude est décomposée en un certain nombre de sous-bassins composant une grappe et reliés entre eux par une relation d'arborescence. Il est alors possible d'affecter des prélèvements/rejets propres à chaque sous-bassin.

Dans toutes les études consultées et utilisant un modèle global, il est procédé à une « re-naturalisation » des débits ou des niveaux piézométriques. Cette approche présente effectivement l'intérêt de pouvoir travailler sur des séries de données plus importantes (période antérieure à la connaissance des prélèvements), de calculer des débits caractéristiques (QMNA5, ...) et d'évaluer l'impact des prélèvements actuels ou envisageables sur ces débits caractéristiques.

Idéalement, les débits non influencés seraient à modéliser sur une période ancienne, précédant le développement des prélèvements (avant les années 80 dans la plupart des cas, Cf. étude de l'entité hydrogéologique de la Mosson ; BRGM, 2011). Toutefois, faute de données, cette solution est très rarement envisageable.

Les débits et niveaux « naturels » doivent alors être modélisés en prenant en compte des prélèvements répertoriés. Dans le cas d'une nappe connectée à un cours d'eau avec un débit objectif d'étiage à respecter, on peut retenir la méthodologie suivante :

- calage du modèle pluie-débit sur la période où sont connus les prélèvements sur une chronique de débits « naturalisés » (il est rare de disposer des prélèvements avant le milieu des années 90) :
 - la naturalisation des débits nécessite de connaître de façon précise la répartition spatio-temporelle des prélèvements / rejets et leur impact sur le débit du cours d'eau. Comme vu précédemment, ces connaissances sont très partielles. Le

recours à des solutions analytiques pour approcher l'impact des pompages sur la rivière (en termes d'atténuation et de décalage temporel) est préconisé pour appuyer les hypothèses de naturalisation des débits ;

- quand le cours d'eau est soutenu par la nappe, l'ajout d'une chronique piézométrique en entrée du modèle permet généralement de mieux retranscrire les débits de la rivière, en particulier en période d'étiage (option à tester dans la mesure des données disponibles) ;
 - certains logiciels offrent la possibilité de considérer deux réservoirs souterrains permettant de distinguer deux types d'écoulement ("lent" et "très lent"). Cette option peut s'avérer intéressante pour modéliser les aquifères à double porosité (porosité de fissures + porosité matricielle pour aquifères carbonatés par exemple).
- validation du modèle sur une période antérieure sans prise en compte des prélèvements. En fonction de la disponibilité des chroniques de pluie, ETP, débits et niveaux, la période la plus longue possible est à valoriser. Si le calage est validé, il est alors possible d'exploiter une grande série de débits simulés et de procéder ainsi à des traitements statistiques robustes. On s'attachera à analyser la différence entre le débit simulé et le débit observé pour juger de l'influence des pompages et valider le modèle ;
 - calcul des volumes cumulés disponibles de période de retour 5 ans sur la base d'un débit d'objectif (volumes mensuels, volume cumulé sur la période d'irrigation, ...). Il s'agit de cumuler les débits excédentaires au débit d'objectif sur une période donnée ;
 - à l'instar des modèles maillés, une analyse de sensibilité est également possible afin d'explorer diverses gammes de variation des paramètres de calage autour de la solution optimale retenue.

Par ailleurs, il est aussi envisageable d'utiliser le modèle en mode prévision dans le but d'actualiser les volumes prélevables en fonction d'une situation hydrologique initiale donnée. Dans certains contextes, cette alternative est précieuse car les débits de l'année précédente influent directement sur les volumes prélevables de l'année suivante.

La fiabilité des modèles globaux est directement dépendante de la longueur et de la représentativité (valeurs extrêmes) des séries de données ayant servi au calage. L'actualisation des modèles (validation sur période récente) et, le cas échéant, des volumes prélevables apparaît donc essentielle.

Enfin, il est rappelé que la transposition d'un modèle pluie-débit à un bassin versant voisin est hasardeux sauf si un fonctionnement hydrogéologique similaire a été démontré et si quelques jaugeages sont disponibles en étiage (une vingtaine au minimum d'après Lebecherel et al, 2015).

4.9. RÉSULTATS ET ACTUALISATION

Tout d'abord, une gestion optimale de la ressource en eau ne peut pas s'envisager sur la base d'un volume prélevable annuel. Il est, par conséquent, impératif que les études aboutissent à la détermination d'un volume prélevable mensuel ou *a minima* un volume cumulé sur la période de tension (étiage, période d'irrigation).

Nous avons beaucoup insisté sur les incertitudes associées à l'estimation des volumes prélevables. Celles-ci étant difficiles à quantifier, il est capital que la présentation des résultats soit accompagnée d'un rappel des principales limites identifiées :

- limites de connaissance et hypothèses retenues pour y remédier : disponibilité des données de suivi de la ressource, méconnaissance des prélèvements, lacunes dans la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème, etc. ;
- limites d'ordre méthodologique : intrinsèques aux outils employés, relatives à la définition des critères d'objectif, stratégies de simulations mises en œuvre, etc.

Dans la mesure du possible, après analyse des principaux biais introduits dans l'estimation, il serait intéressant de conclure quant à leur implication sur le résultat : l'estimation des volumes prélevables est-elle optimiste ou pessimiste ?

En outre, au regard des nombreuses incertitudes, l'estimation des volumes prélevables ne doit pas restée figée dans le temps, une actualisation est indispensable en lien avec l'agrandissement des série de données hydro-climatiques, la mise à jour des modèles, l'amélioration des connaissances, etc.

Le cas échéant, toujours dans le but de consolider l'évaluation des volumes prélevables, il est primordial qu'un programme d'acquisition de données complémentaires et ayant fait défaut soit proposé dans les conclusions de l'étude.

Enfin, les résultats obtenus sont à confronter aux situations historiques, en particulier pour les bassins à déficit avéré, et à la recharge estimée.

5. Conclusions

À partir de l'examen d'un panel de plus de trente études, le BRGM a été en mesure de dresser un premier retour d'expérience sur la détermination des volumes prélevables dans les aquifères à nappe libre.

Les approches développées apparaissent, tout d'abord, très hétérogènes, aussi bien du point de vue méthodologique que de celui des outils utilisés. Quelle que soit la méthode mise en œuvre, les incertitudes liées à l'estimation des volumes prélevables sont nombreuses. En premier lieu, une bonne connaissance de la dynamique des hydrosystèmes et des prélèvements devrait être un prérequis, rarement satisfait. En outre, les méthodes de calcul ainsi que les outils de modélisation qui visent à conceptualiser une réalité complexe présentent des limites intrinsèques.

Il s'avère donc qu'une méthodologie unique, aussi pertinente soit-elle, ne suffit pas à couvrir la variété des contextes hydrogéologiques et se heurte au problème récurrent des données insuffisantes pour obtenir des estimations fiables. De ce fait, il a été décidé de proposer un « catalogue » descriptif de différents cas d'étude dans l'objectif de proposer aux acteurs en charge des études volumes prélevables un choix de méthodologies, susceptibles d'être réutilisées et/ou adaptées.

De nombreuses études (14) aboutissent à la proposition de scénarios de réduction des prélèvements. Des efforts de réduction importants sont parfois attendus avec, par exemple, des unités de gestion concernées par des baisses de prélèvement de 40 % et plus pendant la période d'étiage.

Peu d'études (4) prennent en compte les impacts du changement climatique dans l'évaluation des volumes prélevables à plus long terme.

Des orientations méthodologiques sont enfin proposées par le BRGM, tout en veillant à ne pas imposer une méthodologie unique. Il est, par contre, important qu'une démarche structurante, et commune aux différentes études, soit suivie. Les principales étapes d'une démarche possible sont les suivantes : 1) constitution d'un Comité de Pilotage, 2) caractérisation hydrogéologique de l'hydrosystème, 3) inventaire exhaustif des prélèvements et rejets, 4) définition des objectifs environnementaux, 5) choix de la (des) méthodologie(s) et des outils, 6) délimitation des unités de gestion, 7) détermination des indicateurs de gestion associés aux objectifs environnementaux, 8) estimation des volumes prélevables et confrontation aux situations passées, à la recharge le cas échéant et 9) perspectives d'amélioration et programme d'acquisitions complémentaires si nécessaire.

Enfin, au regard des nombreuses incertitudes mises en exergue au cours de l'étude, l'estimation des volumes prélevables ne devrait pas restée figée dans le temps ; une actualisation est indispensable en lien avec l'agrandissement des série de données hydro-climatiques, la mise à jour des modèles, l'amélioration des connaissances, etc. Dans le même ordre d'idée, il est primordial qu'un programme d'acquisition de données complémentaires et ayant fait défaut soit proposé dans les conclusions de l'étude.

6. Bibliographie

DOCUMENTS MÉTHODOLOGIQUES :

AE-RMC, DIRENs du bassin RMC, ONEMA (2009) – Etudes de détermination des volumes maximum prélevables. Cahier des charges « type ».

AE-RMC (2011) – Bureau du comité de bassin Rhône Méditerranée. Séance du 10 juin 2011. Point IV : méthodes et études des volumes prélevables.

AE-RMC, DREAL RHA, ONEMA (2011) – Débits d'Objectif d'Etiage et Débits de crise. Groupe de bassin Rhône-Méditerranée « gestion quantitative ». Version 2 (juillet 2011).

AE-RMC, IRSTEA, ONEMA (2013) – Note du secrétariat technique du SDAGE. Mieux gérer les prélèvements d'eau. L'évaluation préalable des débits biologiques dans les cours d'eau.

AE-RMC (2015) – Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire. Guide méthodologique.

Barthélemy Y., Seguin J.J. (2016) – Modélisation maillée des écoulements souterrains. Principes, démarche et recommandations. Rapport final - Version 1. Rapport BRGM/RP-62549-FR.

Bredehoeft J. D. (2002) – The water budget myth revisited : why hydrogeologists model. Ground Water vol. 40, n° 4, pp 340-345.

Caballero Y., Lanini S., Seguin J.-J., Charlier J.-B., Ollivier C. (2015) – Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin RMC. Rapport de fin de 1^{ère} année. BRGM/RP-64779-FR.

CRESEB (2015) – Débit minimum Biologique (DMB) et gestion quantitative de la ressource en eau. Guide Version 0 (septembre 2015).

Forkasiewicz J. et Peaudecerf P. (1976) – Évaluation des débits soustraits à une rivière par un pompage dans un puits riverain. Rapport BRGM 76 SGN 032 AME.

Gustard, A. & Demuth, S. (2009) – Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report No. 50, WMO-No. 1029.

Hunt B. (2003) – Unsteady stream depletion when pumping from semi-confined aquifer. ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 8, No.1, 12-19.

Hunt B. and Scott D. (2007) – Flow to well in a two-aquifer system. J. of Hydrologic Engineering, 146-155.

IRSTEA (2008) – Guide méthodologique EVHA.

Lebecherel L., Andréassian V., Augeard B., Sauquet E., Catalogne C. (2015) – Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ? Collection « comprendre pour agir » Onema. 28 p.

Seguin J.-J., Thiéry D. (2008) – Modélisation des hydrosystèmes: une aide à la gestion des ressources en eau. Rapport BRGM/RP-56974-FR.

Seguin J.-J. (2009) – Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes. Orientations méthodologiques. BRGM/RP-58139-FR.

Seguin J.-J. (2013) – Présentation de six modèles hydrogéologiques spatialisés dédiés à la gestion de la ressource en eau souterraine, à l'évaluation de risques, à la quantification d'impacts climatiques. Rapport BRGM/RP-62559-FR.

Seguin J.-J. (2016) – Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines. BRGM/RP-65635-FR

Stollsteiner P. (2011) – Guide pour la détermination des indicateurs piézométriques en vue d'une gestion quantitative de la ressource. Rapport BRGM/RP-61374-FR.

Theis C. V. (1940) – The source of water derived from wells : essential factors controlling the response of an aquifer to development. Civil Engineer 10, 277-280.

Vernoux J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E. (2010) – Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE. Rapport BRGM/RP-57044-FR.

ÉTUDES D'ESTIMATION DES VOLUMES PRÉLEVABLES CONSULTÉES :

AMEVA (2013) – Étude de définition des débits d'objectif biologique et de faisabilité de mesures de soutien d'étiage sur les cours d'eau du bassin de la Somme ». Rapport de la Phase 2 : détermination des Débits d'Objectif Biologique (DOB) par sous bassin.

ANTEA (2013) – Étude de détermination du volume prélevable sur l'aquifère des sables astiens (34)

Artelia (2012a) – Études d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous bassin versant de la Drôme des collines.

Artelia (2012b) – Études d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous bassin versant de la Galaure.

Artelia (2012c) – Études d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous bassin versant de la Véore Barberolle.

Artelia (2013) – Sous bassin versant la basse vallée de l'Ain. Etude d'estimation des volumes prélevables globaux. Rapport Phase 5 août 2013 n° 174 1869.

Artelia, Idées Eaux (2013) – Études d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous bassin versant de l'Ouvèze d'Ardèche. Rapports de phases 5 et 6

Artelia, HGM Environnement (2014) – Etudes des nappes alluviales Môle-Gisclé : détermination des volumes maximums prélevables et préservation de la ressource stratégique. Rapport Phase 3 : impact des prélèvements et quantification de la ressource.

Artelia, HGM Environnement (2015) – Etudes des nappes alluviales Môle-Gisclé : détermination des volumes maximums prélevables et préservation de la ressource stratégique. Rapport Phase 4.

BRGM (2009) – Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne - Modélisation de la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif – Année 3. Rapport BRGM/RP-57184-FR.

BRGM (2010) – Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique. Rapport BRGM/RP-58297-FR.

BRGM (2011) – Caractérisation du comportement d'un indicateur piézométrique et définition des volumes prélevables sur les compartiments carbonatés Nord et Sud de l'entité MOSSON de la masse d'eau FR_DO_124. Rapport BRGM/RP-59658-FR.

BRGM (2013a) – État initial et diagnostic du SAGE GTI : calcul des volumes maximums prélevables et simulation prévisionnelle. Rapport final BRGM/RP-62392-FR

BRGM (2013b) – Connaissances des ressources réellement disponibles sur l'ensemble des bassins versants crayeux de Champagne-Ardenne. Rapport BRGM/RP-61371-FR

BRGM (2014a) – Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 3 : Utilisation du modèle hydrogéologique pour la mise à jour de la ZRE et le calcul des volumes prélevables. Rapport BRGM/RP-62863-FR.

BRGM (2014b) – Evaluation de l'exploitabilité de ressource en eau souterraine de la nappe de la craie du bassin de la Somme. Rapport final BRGM/RP-63408-FR.

BRL (2011) – Étude des volumes prélevables et identification des ressources stratégiques sur la nappe de Dijon Sud. Phases 4 et 5 : détermination du débit d'objectif d'étiage, du volume prélevable et des objectifs de niveau de nappe.

BRL (2013) – Études d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous bassin versant du Garon. Phase 3 : détermination d'objectifs quantitatifs. Rapport final.

BRL, Hydrofisis (2014) – Gestion de la nappe alluviale du Rhône court-circuité de Péage de Roussillon. Phase 3 : détermination des volumes prélevables et des objectifs de niveau de nappe.

BRL, Hydrofisis (2015) – Gestion de la nappe alluviale du Rhône court-circuité de Péage de Roussillon. Phase 4 : organisation de la gestion collective.

BURGEAP (2010) – SAGE de l'Est lyonnais. Simulations quantitatives pour la mise en place du plan de gestion dynamique de la nappe de l'Est lyonnais.

BURGEAP (2013) – SAGE de l'Est lyonnais. Plan de gestion de la nappe de l'Est Lyonnais GESLY 4. Actualisation des volumes prélevables. Rapport REAUCE00684.

CACG (2009) - Détermination des volumes prélevables initiaux dans les cours d'eau et les nappes d'accompagnement des unités de gestion en zone de répartition des eaux du bassin Adour Garonne. Bassin de la Seudre.

Calligée (2008) Expertise et objectifs du projet de SDAGE de la ressource en eau sur la bordure Nord du Marais Poitevin vendéen, Bassin du Lay, de la Vendée et des Autizes, et propositions de principes de gestion. Phase 3 : étude d'un cadre de gestion des nappes du Sud-Vendée compatible avec les enjeux écologiques et économiques. Rapport N08-85138C.

Cereg (2011a) – Étude d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous bassin versant de l'ASSE. Rapport final phases 5 et 6.

Cereg (2011b) – Étude d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous bassin versant de la Bleone. Rapport final phases 5 et 6.

Cereg (2013) – Études d'estimation des volumes prélevables globaux. Bassin versant du Lez. Détermination des volumes prélevables et des débits objectifs (Phase 5) / Proposition de répartition des volumes prélevables par usage (Phase 6).

Cereg (2014) – Études d'estimation des volumes prélevables globaux. Bassin versant de l'Eygues. Détermination des volumes prélevables et des débits objectifs (Phase 5) / Proposition de répartition des volumes prélevables par usage (Phase 6).

CETE (2011) - Détermination des volumes prélevables pour l'irrigation dans le département de l'Allier. Rapport final. Affaire n° 03/09/20915.

Croiset N. (2015) – Impacts du projet de prélèvement dans le bassin versant de la Gronde – Apports du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Rapport BRGM/RP-64784-FR.

DREAL Haute-Normandie (2012) – Doctrine régionale. Gestion des autorisations de prélèvements en eau souterraine et superficielle.

Eaucéa (2011) - Détermination des volumes prélevables sur le périmètre du SAGE Cher amont.

Grontmij et Rivages Environnement (2013) – Études de détermination des volumes prélevables. Bassin versant de l'Argens. Phases 4, 5 et 6 : détermination des débits minimums biologiques, des volumes prélevables et débits d'objectif d'étiage.

Grontmij et Rivages Environnement (2014) – Identification et préservation des ressources majeures en eau souterraine pour l'AEP. Lot n°4 : Etude des alluvions du Gapeau, et des alluvions et formations du Muschelkalk de la plaine de l'Eygoutier. Rapport de phase 2. Etape 3 – Complément à l'étude des volumes maximums prélevables des alluvions du Gapeau..

ISL (2009) - Détermination des volumes prélevables dans les cours d'eau et les nappes d'accompagnement des unités de gestion en zone de répartition des eaux du bassin Adour Garonne. Lot A1 : Hers Mort, Girou et Sor. Version 4.3. Rapport final.

Rapport du groupe d'experts (2007) - Mise en place à la demande du ministère de l'écologie sur les niveaux d'eau dans la Marais Poitevin, la piézométrie des nappes de bordure et les volumes prélevables pour l'irrigation dans le périmètre des SAGE du Lay, de la Vendée et de la Sèvre-Niortaise et du Marais Poitevin.

REILE (2012) – Sous-bassin Haut-Doubs. Détermination des volumes prélevables. Rapport d'étape, Phase 5.

SAFEGE (2012) – Étude de détermination des volumes prélevables sur le bassin versant de la Tille. Rapport des phases 5 et 6 : détermination des DOE, des volumes prélevables et des NPA. Proposition de répartition des volumes prélevables.

SAFEGE (2013) – Étude de détermination des volumes maximum prélevables de la nappe alluviale du confluent Breuchin-Lanterne. Rapport des phases 5 et 6 : détermination des Débits d'Objectif d'Etiage et des volumes prélevables et proposition de répartition.

Annexe 1 – Récapitulatif des études consultées

Bassins Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire Bretagne, Rhin-Meuse et Seine-Normandie

Bassin	Site	Année	Maitre d'œuvre	Ressources étudiées	Contexte hydrogéologique	Outils	Méthode	Critères d'objectif	Volumes prélevables	Paragraphe du rapport
AG	Arège	2009	BRGM	ESO	nappe alluviale	Modèle maillé (MARTHE)	construction de 6 scénarios climatiques croisant différentes recharges hivernales et printanières simulation d'un état piézométrique de référence correspondant au maintien des DOE : piézométrie simulée en septembre à partir d'un état piézométrique moyen au mois d'octobre précédent et après 12 mois avec un scénario climatique sec (simulations de 6 états piézométriques (6 scénarios climatiques construits) différents à la fin du mois d'avril (début irrigation)) calcul des VP pour chaque scénario climatique et chaque LG par différence avec l'état piézométrique de référence	DOE (SDAGE), état piézométrique simulé correspondant au maintien du DOE	Volume période d'irrigation (mai à septembre)	§ 3.3.10
AG	Hers Mort, Girou, Sor	2009	ISL	ESU + ESO	alluvions	Sans modèle	reconstitution des débits naturels	DOE (débits issus des arrêtés et QMNAS)	Volumes mensuels pour l'irrigation de juin à octobre, ESU et ESO non distingués	
AG	Seudre	2009	CACG	ESU + ESO	alluvions + multi-couche sédimentaire	Modèle global pluie-débit (modèle 3 réservoirs, logiciel non précisé)	reconstitution des débits naturels	DOE définis dans le SDAGE	Volumes global (juin-octobre) pour l'irrigation, ESU et ESO non distingués	§ 2.3.3
AP	Craie Champagne	2013	BRGM	ESO	aquifère crayeux	Modèle global à réservoirs (Gardenia), modèles pluie-débit-niveau	utilisation des modèles en mode prévision avec deux états initiaux distincts : fin septembre 2011 (année sèche à moyenne) et fin septembre 2001 (année humide) avant de scénarios climatiques que d'années disponibles en pluie et ETP : n débits simulés à chaque pas de temps sur lesquels on calcule les probabilités de non dépassement VP calculés sur la base des débits de probabilité de non dépassement de 20 % (8 années sur 40) simulation en mode prévision sur 12 ans de plusieurs scénarios de prélèvement (situation non influencée, 60, 70, 80, 90, 100, 120 et 150% des prélèvements, 2005)	Volume global sur 2 périodes : mai à sept et juin à août	§ 2.3.3, § 3.2.3	
AP	Craie du bassin versant de la Somme	2014	BRGM	ESU+ESO	craie sénonienne	Modèle maillé (MARTHE)	scénario climatique : 7 ans et 8 mois avec une pluie moyenne, pluie 5 ans sec à partir de septembre sur une période de 4 ans	DMB (non dépassé pendant la 1ère année sèche)	Volume annuel	§ 2.3.2, § 2.3.4, § 3.3.3, § 3.4.1
LB	Département de l'Ailier	2011	CETE	ESU + alluvions	arènes granitiques + alluvions	Sans modèle	reconstitution des débits naturels	DOE SDAGE, Arrêtés sécheresse, QMNAS	Volume global étiage et hors étiage, ESU et ESO non distingués	§ 2.3.1, § 2.3.3
LB	SAGE Cher amont	2011	Eaucéa	ESU + ESO	nappe profonde	Modèle semi-distribué pluie-débit (modèle à réservoirs, logiciel CyclopeurPE)	non traitée (pas de piézométrie)	DOE SDAGE Loire Bretagne, débits Arrêtés préfectoraux et QMNAS	Recapitulatif des volumes maximums passés	
LB	Sud Vendée	2008	Calligée	ESO	nappes du Jurassique en lien avec le réseau hydrographique et le Marais Poitevin	Sans modèle	reconstitution des débits naturels	NPA (SDAGE LB)	Volume global pour l'étiage (avril-octobre) et pour l'hiver (nov-mars), ESU et ESO non distingués	§ 3.1.4, § 3.4.1
LB	Périphérie du Marais Poitevin	2012, 2013	BRGM	ESU+ESO	nappes du Jurassique en périphérie du Marais Poitevin	Modèle maillé (MARTHE)	mise en évidence d'une relation linéaire entre niveaux piézométriques et volumes estivaux pompés pour les années non influencées par une recharge estivale construction d'abaques permettant d'estimer le volume estival exploitable en fonction du seuil piézométrique à ne pas franchir	2 Piézométries Objectif d'Etiage : printemps et été	Volume estival	§ 3.3.4, § 3.4.1, § 4.4.1
RM	Grès du Trias	2013	BRGM	ESO	Grès du Trias inférieur (parties libre et captive)	Modèle maillé (MARTHE)	simulation sur 2000-2007 de plusieurs scénarios de réduction des prélèvements	stockage / déstockage de l'aquifère pour 2010	Volume annuel sur les 2 secteurs captifs	§ 2.3.2
SN	Plaine de Caen et bassin de la Dives	2014	BRGM	ESU + ESO	aquifères sédimentaires superposés	Modèle maillé (MARTHE)	simulation d'un scénario non influencé (prélèvements à 0) sur la période 1971-2010 au pas de temps mensuel. Calcul des QMNAS naturels simulation de différents scénarios de pompage au pas de temps mensuel sur la période 1971-2010 (estimation des VP par essai-erreur dans le but de respecter le critère d'objectif)	Impact maximal de 30% sur le QMNAS naturel	Volume annuel, volume étiage	§ 3.3.2, § 3.4.1

Bassin Rhône Méditerranée Corse

Bassin	Site	Année	Maitre d'œuvre	Ressources étudiées	Contexte hydrogéologique	Outils	Méthode	Critères d'objectif	Volumes prélevables	Paragraphe du rapport
RMC	Nappe de l'Est Lyonnais	2010, 2013	BURGEP	ESO	alluvions fluvioglaciaires, connexions avec aquifères sous-jacents et bordiers, échanges nappe-rivière et nappe-zone humide	Modèle maillé (Wodflow)	simulation de plusieurs scénarios de prélèvements (6) au pas de temps mensuel sur 10 ans (recharge moyenne de la période 1991-2009 sur 8 ans et une recharge faible (2007) sur 2 ans)	état piézométrique stationnaire sur les 10 ans de la simulation : NPA respect du DMB de l'Ozon définition d'un NPA correspondant au maintien d'une nappe subaffleureante au droit de la zone humide	Volume annuel	§ 3.3.5, § 3.4.2
RMC	Aquifère des sables astiens	2013	ANTEA	ESO	nappe des sables astiens (libre et captive), aquifère côtier	Modèle maillé (logiciel Talsman)	simulation au pas de temps mensuel de différents scénarios de réduction des prélèvements sur l'année 2007, année particulièrement sèche.	NPA pour 4 piezos du SDAGE, niveaux de vigilance pour les autres, autres indicateurs statistiques	Volumes mensuels	§ 2.3.1, § 2.3.2, § 3.3.1
RMC	BV Tillé	2012	SAFEGE	ESU + ESO	alluvions récentes	Modèle maillé (logiciel Horizons)	reconstitution des débits naturels	DOE	Volume étagés, ESU et ESO non distingués	§ 4.4.1
RMC	BVASSE	2011	CEREG	ESU (nappe profonde)	graviers profonds de la Tillé (nappe captive)	Modèle maillé	Analyse chronique piezo et évolution prélèvements + bilan équilibré par modèle maillé	bilan hydrologique équilibré	Volume annuel	§ 3.4.2
RMC	BV Blicone	2011	CEREG	ESU + ESO	alluvions	Modèle Athys + modèle nappe alluviale sous Excel	reconstitution des débits naturels	DOE, DMB	Volumes mensuels, ESU et ESO non distingués	§ 3.4.2
RMC	Haut-Doubs	2012	Reilé	ESU + karst	calcaires karstiques	Sans modèle	reconstitution des débits naturels	DOE, DMB	Volume annuel, ESU et ESO non distingués	§ 3.4.2
RMC	Nappe de Dijon Sud	2011	BRL	ESO	nappe alluviale en connexion avec une autre nappe alluviale et l'aquifère jurassique karstique	Modèle maillé (Wodflow)	simulation de 7 scénarios de prélèvement pour des conditions climatiques équivalentes aux 20 dernières années scénarios exploratoires : report d'une partie des prélèvements agricoles en hiver (stockage), répartitions différentes entre champs captants et aquifères	DMB source des Cent Font (2 années sur 10)	Volume annuel	§ 3.3.7
RMC	Drôme des collines	2012	ARTELIA	ESU + ESO	nappe de la molasse du miocène sous nappe alluviale (relation étroite avec cours d'eau)	Modèle semi-distribué à 2 réservoirs (pluie-débit) + solution analytique	reconstitution des débits naturels	DMB trop souvent dépassés, méthodologie modifiée (validée par les services de l'Etat)	Volume mensuel (juin à septembre), ESU et ESO non distingués	§ 2.3.1, § 2.3.3, § 3.2.1, § 3.4.1
RMC	Galaure	2012	ARTELIA	ESU + ESO	nappe de la molasse du miocène sous nappe alluviale (relation étroite avec cours d'eau)	Modèle semi-distribué à 2 réservoirs (pluie-débit) + solution analytique	reconstitution des débits naturels	idem DMB	Volumes mensuels (juin à septembre), ESU et ESO non distingués	§ 3.2.1, § 3.4.1
RMC	Véore Barberolle	2012	ARTELIA	ESU + ESO	nappe de la molasse du miocène sous nappe alluviale (relation étroite avec cours d'eau)	Modèle semi-distribué à 2 réservoirs (pluie-débit) + solution analytique	reconstitution des débits naturels	idem DMB	Volumes mensuels (juin à septembre), ESU et ESO non distingués	§ 3.2.1

Bassin	Site	Année	Maître d'œuvre	Ressources étudiées	Contexte hydrogéologique	Outils	Méthode	Critères d'objectif	Volumes prélevables	Paragraphes du rapport
RMC	Basse vallée de l'Ain	2013	ARTELIA	ESO	nappe alluviale de l'Ain	Modèle maillé (Modflow)	plusieurs scénarios de réduction des prélèvements testés simulés au pas de temps décadaire sur la période 2003-2007	zone à enjeux : situation été 2006 (Qnap-rivière de 1 m3/s pendant les 3 décades les plus sèches) + ration annuel prélèvement / recharge limité à 30 % zones hors enjeux : restauration de l'intégralité de la réserve aquifère lors d'un cycle hydrologique + ration annuel prélèvement / recharge limité à 30 %	Volume global pour la période d'étiage	§ 3.3.8, § 3.4.1
RMC	Ouvèze, Ardèche	2013	ARTELIA, Idées Eaux	ESO	nappe des grès du Trias	Sans modèle	bilan hydrologique au pas de temps mensuel sur 2000-2010	Bilan équilibré. Niveau d'alerte = tiers de la hauteur de l'aquifère à ne pas dénoyer au droit de chaque forage	Volumes mensuels pour la période d'étiage (par forage)	§ 2.3.1
RMC	Garon	2013	BRL	ESO	nappe alluviale du Garon	Modèle maillé (Feflow)	simulation de différents scénarios de réduction des prélèvements sur la période 1980-2010	équilibre du bilan hydrologique moyen sur 1990-2010 +	Volume annuel pour l'ensemble de la nappe (uniquement exploitée pour AEP)	§ 2.3.1, § 2.3.2, § 3.3.9, § 3.4.1
RMC	Argens	2013	Grontmij	ESO	nappe alluviale	Sans modèle	simulation exploratoire : report de tous les prélèvements sur la nappe amont (1980-2010)	cote d'alerte d'une chronique piézométrique de référence (cote des sources de la Mouche)	4 périodes distinguées : recharge, hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux	§ 3.1.2
							Analyse de situations historiques de référence : conditions climatiques, prélèvements, piézométrie, conductivité électrique de l'eau calcul des débits de la nappe par différentes approches Calcul des débits de la nappe par différentes approches	NPA définis sur la base de l'évolution des concentrations en chlorures	Volume global, volume mensuel et débit maximum instantané pour chaque période	
RMC	BV du Lez	2013	CEREG	ESU+ESO	nappe alluviale + molasse + marno-calcaire et grès	Modèle Athys + Modèle maillé (Modflow) + modèle Nappe sous Excel	reconstitution des débits naturels	DMB ou gain d'habitat pour le milieu	Volume mensuel pour la période d'étiage, ESU et ESO non distinguées	§ 2.3.1, § 2.3.2, § 3.4.1, § 3.4.2
RMC	BV de l'Eygues	2014	CEREG	ESU+ESO	nappe alluviale + molasse + marno-calcaire et grès	Modèle Athys + Modèle maillé (Modflow) + modèle Nappe sous Excel	reconstitution des débits naturels	DMB ou gain d'habitat pour le milieu	Volume mensuel pour la période d'étiage, ESU et ESO non distinguées	§ 3.4.1, § 3.4.2
RMC	Plaine alluviale Breuchin Lanterne	2013	SAFEGE	ESU+ESO	nappe alluviale	Modèle global à réservoirs (logiciel NAM)	reconstitution des débits naturels (sur la base des résultats du modèle maillé, les prélèvements en nappe sont considérés comme des prélèvements directs au cours d'eau)	DMB	Volumes mensuels sur la période d'étiage (avril-octobre), ESUP et ESOUT non distinguées	§ 2.3.1, § 2.3.3
						Modèle maillé (Modflow), pas directement utilisé pour l'estimation des VP				
RMC	Aquifère jurassique de l'entité Mosson	2011	BRGM	ESO	calcaires jurassiques karstiques sous couverture	Modèle global de type boîte noire (Tempo), modèles pluie-niveau et pluie-niveau-débit	reconstitution des niveaux piézométriques naturalisés à partir des premières années de la chronique (avant mise en route des prélèvements) / utilisation du modèle avec les prélèvements en mode prévision pour différents scénarios de prélèvement + analyse historique de données (piézométrie, conductivité, pluviométrie, prélèvements)	NPA et NPCr (définis dans le cadre de l'étude)	Volume annuel	§ 2.3.1, § 3.1.3, § 3.2.2
RMC	Alluvions du Gapeau	2014	Grontmij	ESO	nappe alluviale, forte hétérogénéité des échanges nappe-rivière	Sans modèle	analyse croisée des données historiques aux pas de temps annuel, mensuel et journalier : prélèvements, niveaux piézométriques, conductivité électrique de l'eau	Niveaux piézométriques d'alerte et seuils de conductivité déterminés dans le cadre de l'étude (chroniques 1995-2007)	Volumes annuel, mensuel et journalier	§ 3.1.1
					problématique d'intrusion saline		estimation de débits instantanés à partir de la loi de Darcy sur la base de rabattement et rayon d'influence admissibles (confrontation aux résultats du modèle maillé développé par Burgeap)		Débit exploitable instantané	
RMC	Péage du Roussillon	2014	BRL	ESO	nappe alluviale du Rhône, relation étroite avec les eaux superficielles, échanges variables	Modèle maillé (Modflow)	simulation de différents scénarios de prélèvement (réduction ou augmentation) sur une année type correspondant à une situation hydrologique peu favorable (rencontrée 1 année sur 5)	connexion des habitats prioritaires à la nappe. 3 niveaux d'exigence : maintien de la connexion pour 50%, 75% et 90% des habitats (par rapport à la piézométrie simulée sans prélèvement)	Volume maximum journalier	§ 3.3.6, § 3.4.1
RMC	Nappes alluviales Giscle Môle	2015	ARTELIA / HGM	ESO	nappe alluviale, hétérogénéité des échanges nappe-rivière (perte, drainance) assecs, problématique d'intrusion saline	Modèle maillé (Modflow)	simulation d'un scénario non influencé (sans prélèvement ni rejet) 8 simulations croisant différentes conditions climatiques, différents scénarios de prélèvement et d'alimentation par les eaux du barrage de la Verne	NPA définis à partir des simulations (durée et étendue des assecs)	Volume étiage (juin à septembre)	§ 3.3.11



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34