

The background of the slide is a technical geological or hydrological map. It features brown contour lines representing topography. A network of blue lines indicates faults or fractures. Various areas are shaded in light blue and labeled with codes such as 'h3a-b', 'h3c', 'd6-h1a', 'h1b', 'h2', 'd3-5', 'd6-h1a', 'h1b-2', 'h3a', 'd6-h1a', 'h1b', 'h3a-b', 'h3c', 'dsb', 'h1b-2', and 'd7-h1a'. The map is framed by a thin blue border. In the top right corner, there is a coordinate value '2113.21 6766.13 0'. In the bottom left corner, another coordinate value is visible: '89 3740.46 -625.5'.

Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez – synthèse des résultats et recommandations

Rapport final L5
BRGM/RP-61051-FR
novembre 2014

BRGM/RP-61051-FR
novembre 2014



Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez – synthèse des résultats et recommandations

Rapport final L5

BRGM/RP-61051-FR
novembre 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets de
Recherche du BRGM 2014

J.C. Maréchal, B. Ladouche, C. Batiot-Guilhe, V. Borrell-Estupina, Y. Caballero, F. Cernesson, N. Dörfliger, P. Fleury, M. Jay-Allemand, H. Jourde, V. Leonardi, P.-O. Malaterre, J.L. Seidel, P.Y. Vion

Vérificateur :

Nom : C. Lamotte

Date : 09/12/14



Approbateur :

Nom : A. Blum

Date : 09/12/14



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.

Mots clés : eau souterraine, hydrogéologie karstique, gestion active, AEP, Montpellier, crue, modélisation, changement climatique, pompage, vulnérabilité, qualité, faune stygobie

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

Maréchal, JC., Ladouche, B., Batiot-Guilhe, C., Borrell-Estupina, V., Caballero, Y., Cernesson, F., Dörfliger, N., Fleury, P., Jay-Allemand, M., Jourde, H., Leonardi, V., Malaterre, PO., Seidel, JL., Vion PY. (2014) Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez –synthèse des résultats et recommandations – Rapport BRGM/RP-61051-FR, 126 pages.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les aquifères karstiques constituent des réservoirs d'eau souterraine importants pour faire face à une hausse croissante des besoins en eau, notamment du fait de l'augmentation démographique dans les régions méditerranéennes, tout particulièrement sur le littoral et au sein de ses métropoles. Une « gestion active » permet d'exploiter de manière optimale la ressource en eau de ces systèmes, en s'affranchissant des effets négatifs des fortes variations de débit des sources de type vauclusien. Il s'agit de pomper, en saison sèche, à un débit supérieur au débit d'étiage, afin de solliciter les réserves que renferment ces aquifères. Celles-ci se reconstituent ensuite au cours de la saison des pluies suivante avec, pour possible conséquence une diminution de l'intensité des crues au début de la saison des pluies.

Par ailleurs, la préservation du milieu écologique des fleuves côtiers revêt également un enjeu important, notamment en période d'étiage, période durant laquelle un soutien par une partie des eaux pompées constitue une solution pour le maintien d'un débit réservé, permettant le bon équilibre écologique du cours d'eau. Une gestion multi-usages de tels aquifères est donc susceptible de répondre de manière intégrée à ces problématiques en apparence antagonistes : besoins supplémentaires en eau pour l'AEP, réduction des risques d'inondation et contribution à la préservation des milieux aquatiques.

Le projet de recherche « Gestion multi-usages des aquifères karstiques méditerranéens – Le Lez, son bassin versant et son bassin d'alimentation » regroupe un partenariat scientifique et technique constitué par le BRGM, les UMR HydroSciences Montpellier (HSM), G-EAU, TETIS, le CERFACS et BIOTOPE. Il bénéficie du soutien financier de l'Agglomération de Montpellier, de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, et du Conseil Général de l'Hérault. Son objectif est d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement de l'hydrosystème du Lez et la qualité de la ressource dans un contexte de gestion active et de changement global.

Le présent rapport synthétise les principaux résultats acquis durant le projet. Ces résultats sont présentés à l'échelle de l'hydrosystème du Lez et de son bassin hydrogéologique avec sa structure et son fonctionnement. Ensuite, un zoom décrit la source du Lez et son exploitation ainsi que l'état quantitatif de la masse d'eau. Les problématiques de caractérisation hydrogéochimique, qualité de l'eau, faune stygobie et de vulnérabilité du réservoir sont ensuite abordées. L'impact de l'exploitation de l'aquifère karstique sur les crues est étudié et un outil d'aide à la prévision des crues à La Valette est proposé, ainsi que des abaques de propagation des crues au travers de Montpellier. Des scénarios d'exploitation future couplés à des modèles de changement climatique sont simulés.

Les principales avancées scientifiques sont les suivantes : (i) amélioration de la connaissance géologique de la zone d'étude grâce à un modèle géologique 3D, (ii) nouvelles informations sur la délimitation du bassin hydrogéologique grâce aux traçages artificiels, (iii) mise en évidence d'une karstification profonde en lien avec le

drain principal au sein d'un nouveau forage au Triadou, (iv) sous réserve de l'absence d'impact négatif de l'exploitation sur les eaux de surface (débit biologique du fleuve Lez), la masse d'eau concernée est en bon état quantitatif, (v) démonstration par modélisation de la possibilité d'augmenter les prélèvements à la source sous réserve de modifier la Déclaration d'Utilité Publique (DUP), (vi) mise en évidence d'une bonne qualité chimique de l'eau dans l'ensemble, mais d'une qualité bactériologique pouvant être ponctuellement dégradée par des eaux usées (fuite de réseau de collecte, assainissements autonomes défaillants, rejets de STEP), (vii) absence de contamination chronique en pesticides, (viii) mise en évidence d'un haut lieu de biodiversité souterraine dans le Lez qui semble relativement épargné par les influences anthropiques jusqu'à présent, (ix) établissement d'une cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère et comparaison avec l'occupation du sol pour estimer le facteur de risque, (x) quantification de l'impact du niveau piézométrique initial dans le karst sur sa capacité de rétention lors d'un épisode de crue, (xi) établissement d'un outil d'aide à la prévision des crues à Lavalette, qui prend en compte l'état du karst avant la pluie, (xii) établissement d'un outil complémentaire de propagation des crues dans le fleuve Lez. (xiii) développement d'un modèle Tempo utilisé pour simuler des scénarios de changement global (climat et volume prélevé).

Au long de ce rapport, des recommandations sont régulièrement énoncées sous la forme d'encadrés grisés. Elles constituent des éléments de base pour le maître d'ouvrage afin d'améliorer la gestion active de ce système karstique.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Structure et fonctionnement de l'hydrosystème Lez.....	17
2.1. CADRE GENERAL DE L'AQUIFERE DU LEZ.....	17
2.2. GEOLOGIE DU SECTEUR DU LEZ.....	18
2.2.1. Coupes géologiques.....	18
2.2.2. Modèle géologique tridimensionnel	20
2.2.3. Tectonique et karstification	22
2.3. BASSIN HYDROGEOLOGIQUE DE LA SOURCE DU LEZ.....	24
2.3.1. Introduction	24
2.3.2. Pertes et traçages artificiels	25
2.3.3. Impluvium.....	31
2.4. FORAGES COMPLEMENTAIRES	32
3. La source du Lez et son exploitation.....	35
3.1. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION.....	35
3.2. LES DEBITS A LA SOURCE DU LEZ	38
3.2.1. Définitions	38
3.2.2. Modélisation	39
3.2.3. Débit naturel.....	41
3.2.4. Débit de pompage	44
3.2.5. Débit de sollicitation des réserves du karst.....	45
3.3. GESTION ACTIVE	46
3.4. PIEZOMETRIE ET CYCLES DE POMPAGES	47
3.4.1. Introduction	47
3.4.2. Interprétation des pompages à l'échelle saisonnière	48
3.5. BON ETAT QUANTITATIF DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE.....	51
3.5.1. Définition	51
3.5.2. Analyse de l'état quantitatif.....	51
3.6. INDICES SUR LA KARSTIFICATION A PROXIMITE DE LA SOURCE.....	54

4. Qualité et vulnérabilité de l'aquifère karstique du Lez	57
4.1. INTRODUCTION	57
4.2. FONCTIONNEMENT HYDROGEOCHIMIQUE DE L'AQUIFERE	58
4.2.1. Origine de l'eau à la source du Lez	58
4.2.2. Caractérisation des modalités de recharge.....	60
4.3. QUALITE DE LA RESSOURCE EN EAU ET SENSIBILITE AUX IMPACTS ANTHROPIQUES.....	62
4.3.1. Impact des activités agricoles : suivi des pesticides.....	62
4.3.2. Impact de la contamination domestique.....	64
4.3.3. Faune stygobie.....	70
4.3.4. Conclusion	70
4.4. VULNERABILITE INTRINSEQUE.....	71
4.4.1. Introduction et définitions.....	71
4.4.2. Zone d'étude	73
4.4.3. Résultats : carte de vulnérabilité.....	74
4.4.4. Occupation du sol et aléas	77
4.4.5. Zones de sauvegarde.....	83
5. Crues de l'hydrosystème du Lez.....	87
5.1. INTRODUCTION	87
5.2. COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DE L'HYDROSYSTEME EN CRUE	87
5.2.1. Rôle de l'aquifère karstique sur deux événements passés	87
5.2.2. Généralisation du rôle de l'aquifère karstique dans la dynamique de la crue de surface du Lez	88
5.3. OUTILS D'AIDE A LA DECISION POUR LES PREVISIONNISTES EN AMONT DE MONTPELLIER	89
5.3.1. Introduction	89
5.3.2. Modèle opérationnel des crues du Lez	90
5.3.3. Abaque de vigilance opérationnel des crues du Lez	93
5.3.4. Conclusion	96
5.4. OUTILS D'AIDE A LA DECISION POUR LES PREVISIONNISTES - A LA TRAVERSE DE MONTPELLIER	97
5.4.1. Introduction	97
5.4.2. Influence du lit majeur	98
5.4.3. Impact du laminage des crues.....	99
5.4.4. Effet de l'aval lors des régimes transitoires.....	99

5.4.5. Temps de propagation des crues dans le Lez	100
5.4.6. Les affluents de la Lironde et du Verdanson.....	100
5.4.7. Abaques débit - cote	100
5.4.8. Incertitudes	101
6. Gestion active et changement global	103
6.1. CLIMAT PRESENT ET SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS.....	103
6.2. PRELEVEMENTS ACTUELS ET SCENARIOS FUTURS	105
6.2.1. Données de prélèvements actuels (à la source du Lez)	105
6.2.2. Scénarios de prélèvements futurs (à la source du Lez)	106
6.2.3. Scénarios de prélèvements et Schéma Directeur d'Alimentation en Eau Potable (SDAEP)	108
6.3. IMPACT DU CHANGEMENT GLOBAL (CLIMATIQUE ET PRELEVEMENTS) SUR LES RESSOURCES EN EAU DU SYSTEME KARSTIQUE DU LEZ	108
6.4. CONCLUSION	114
6.5. SIMULATION D'UN POMPAGE D'ESSAI DE LONGUE DUREE	115
7. Conclusion générale.....	117
8. Bibliographie	121

Liste des illustrations

Illustration 1 : Structure du projet Lez-GMU à son démarrage avec les sept ateliers (AT0-AT6).....	14
Illustration 2 : Bloc diagramme permettant de visualiser les parties libres et captives de l'aquifère du Lez. La zone saturée de l'aquifère est représentée en bleu clair et les formations imperméables apparaissent en gris clair (modifié d'après Drogue, 1964).....	17
Illustration 3 : Carte de localisation des coupes sériées	18
Illustration 4 : Modèles géologiques 3D de la zone d'étude avec empilement progressif des divers entités stratigraphiques	21
Illustration 5 : Modèle 3D de la zone d'étude avec toutes les unités géologiques – Trias (violet), Lias (bleu foncé), Dogger (brun), Malm (bleu clair), Crétacé (vert foncé), Eocène (orange), Oligocène (rose), Miocène (jaune), Pliocène (beige)	22
Illustration 6 : Bloc diagramme de l'aquifère du Lez (1) et analyses statistiques de la fracturation à l'échelle 250.000ème (2), à l'échelle 25.000ème (3), in situ sur le site du Terrieu (4) ; ainsi que de la karstification en zone non saturée (5). Les analyses statistiques sont réalisées en longueur cumulée (a) ou en fréquence (b).	23

Illustration 7 : Coupe hydrogéologique schématique du système karstique du Lez avec distinction des bassins hydrogéologiques de la source en régime naturel et anthropisé (pompage) ainsi que de l'impluvium correspondant à la zone de recharge principale de l'aquifère (pour ce dernier, par simplification, les bassins des pertes ne sont pas schématisés).	25
Illustration 8 : Synthèse critique des traçages artificiels anciens. La colonne "Confirmation" comprend 4 degrés de qualification: Avéré, Incertain, Confirmé, Infirmé. Les qualificatifs « Avéré et Incertain » reposent sur les conclusions des traçages réalisés entre 1956 et 1977 (Avéré : traçage identifié visuellement à la source, Incertain : traçage identifié par charbon actif). Les qualificatifs « Confirmé et Infirmé en 2010/12 » reposent sur les conclusions des traçages réalisés entre 2010 et 2012.	26
Illustration 9 : Extrait de carte géologique 1 : 250 000 (Ed. BRGM) avec position des traçages artificiels réalisés sur l'aquifère du Lez (trait plein : traçages avérés, trait pointillé : traçages incertains).	27
Illustration 10: Synthèse des cinq essais de traçages réalisés dans le cadre du projet Lez-GMU (* R = Restitution, (+) = résultat positif, (-) = résultat négatif, ? = résultat non démontré)	28
Illustration 11 : Carte des principales pertes, bassins des pertes et essais de traçages sur le bassin hydrogéologique en régime de pompage.	30
Illustration 12 : Limites de l'impluvium de l'aquifère du Lez et bassin hydrogéologique en régime de pompage	32
Illustration 13 : Caractéristiques des forages complémentaires réalisés dans le cadre du projet Lez-GMU	33
Illustration 14 : Extrait de la carte géologique 1 : 25000 de Saint Martin de Londres et de Montpellier avec (a) Localisation des nouveaux forages (Ftr : forage du Triadou ; Fvl1 et Fvl2 : forages de Viols-en-Laval 1 et 2); (b) Localisation de ces nouveaux forages par rapport aux piézomètres existants. Les formations géologiques principales pour l'aquifère du Lez sont : J8-9 (calcaires du Kimméridgien) en bleu-vert clair à l'ouest de la feuille ; n1 (marno-calcaires du Berriasien) en vert foncé à l'est et n2 en vert (marnes ou calcaires du Valanginien).	34
Illustration 15: modalités des conditions de captage depuis 1951	36
Illustration 16 : Forage n°4 de la chambre de captage de la source du Lez	37
Illustration 17: Déversoir du débit restitué au Lez	37
Illustration 18: Déversoir de la source du Lez (photo Ginger environnement, 2010)	38
Illustration 19 : Schéma de fonctionnement hydrodynamique de la source du Lez en hautes eaux (a) et basses eaux (b)	39
Illustration 20 : (a) coupe hydrogéologique de l'aquifère du Lez (b) schéma de modélisation inverse Tempo	40
Illustration 21: Evolution des débits naturels estimés depuis 1975. (a) période 1975 – 1990 (b) période 1990-2010	42
Illustration 22 : Valeurs moyennes annuelles du débit naturel estimées à la source du Lez	43
Illustration 23 : Statistiques descriptives des débits naturels de la source du Lez (valeurs en l/s, période de 34 ans entre 1976 et 2009)	43

Illustration 24 : Evolution de la piézométrie à la source du Lez depuis 1970 et des débits naturels estimés depuis 1975. Les débits de pompage ainsi que les débits de sollicitation des réserves sont également reportés (depuis 1974).....	44
Illustration 25 : Statistiques descriptives des débits prélevés à la source du Lez [1976-1982] et dans les forages [1983-2010], (valeurs en l/s, période de 34 ans entre 1976 et 2010)	45
Illustration 26 : Statistiques descriptives des débits de sollicitations (-Qs) des réserves du karst (valeurs en l/s, période 1976-2009)	46
Illustration 27 : comparaison des débits moyens mensuels de pompage (Qp) (a) et de sollicitation des réserves (-Qs) de l'aquifère (b) avant et après la mise en fonction de l'usine de pompage en 1982	47
Illustration 28 : Exemple d'interprétation du cycle de pompage de 2002	48
Illustration 29 : Tableau de synthèse des paramètres hydrodynamiques estimés au moyen du modèle de Theis appliqué à la source du Lez	49
Illustration 30: Niveaux piézométriques dans les piézomètres d'observation du Lez pendant l'année 2003.....	49
Illustration 31 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques estimés dans les piézomètres d'observation	50
Illustration 32 : Graphique représentant les volumes des précipitations efficaces rechargeant la masse d'eau FRDG113 et les volumes prélevés au niveau de la source du Lez (en rouge) et totaux au niveau de la masse d'eau (en bleu), modifiée d'après Jourde et al. (2011)	52
Illustration 33 : Graphique de la piézométrie mesurée dans le forage d'observation (données journalières) sur plus de vingt années, suite à la mise en exploitation par gestion active de la source du Lez, au niveau du captage	53
Illustration 34 : Graphique de la piézométrie mesurée au niveau d'une sélection de piézomètres situés au sein de la masse d'eau souterraine FRDG113.....	53
Illustration 35 : Logs géologique et technique du forage du Triadou (BSS 09903X0152/TRIADO ; les débits indiqués ont été estimés au soufflage durant la foration)	55
Illustration 36 : Coupe géologique NW-SE passant par la source du Lez et variations du niveau piézométrique observé sur le forage du Triadou (en noir) et à la source du Lez (en bleu) pour la période d'avril à juin 2012	56
Illustration 37 : Compositions chimiques des pôles identifiés et utilisés dans l'approche EMMA.....	59
Illustration 38: Contributions relatives des trois pôles géochimiques aux eaux de la source du Lez sur la période d'étude (2009-2011)	60
Illustration 39 : Evolution temporelle des paramètres débit, température, conductivité électrique, turbidité, Cl, Mg, COT, intensités de fluorescence et bactéries fécales (E. coli) à la source du Lez (Quiers et al., 2011)	61
Illustration 40 : Liste des pesticides sélectionnés pour cette étude. Les composés surlignés en gris font partie des 33 substances prioritaires définies par la DCE. * produits qui ne sont plus autorisés en France	63

Illustration 41 : Concentrations minimales, maximales et moyennes obtenues à la source du Lez pour les molécules étudiées. Période 1997-2011 (banque de données ADES)	64
Illustration 42 : Moyenne Annuelle (MA) et Concentration Maximale Admissible (CMA) pour le Tributylétain dans les eaux selon les Normes Qualité Environnementale (NQE)	65
Illustration 43 : Suivi des concentrations des butylétains dans les sources du Lez, de Restinclières, de Fleurette et du Lirou ; les concentrations supérieures au NQE-CMA sont reportées en rouge.....	66
Illustration 44 : Concentration en butylétains dans les rejets de trois STEP du bassin d'alimentation du Lez.....	66
Illustration 45: Campagne d'étiage d'août 2010- profils des REE dans les eaux.....	67
Illustration 46 : Concentrations en carbamazépine et époxycarbamazépine pour les quatre sources. LD : Limite de détection et LQ : Limite de quantification	69
Illustration 47: Schéma conceptuel d'un aquifère karstique avec le positionnement des différents critères (d'après COST 620, Zwahlen et al.2004)	72
Illustration 48 : Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques	73
Illustration 49: Délimitation de la zone d'étude pour la cartographie de la vulnérabilité	74
Illustration 50 : Carte de la vulnérabilité globale (Vg) à l'échelle de la zone d'étude	75
Illustration 51: Tableau des classes de vulnérabilité globale et pourcentages surfaciques dans la zone d'étude	76
Illustration 52 : Proposition d'extension du périmètre de protection éloigné (ellipses vertes)	77
Illustration 53 :Occupation du sol : comparaison des statistiques exprimées en % et en km ² pour les données CLC 2006 et DRAAF LR 2009 (agrégées respectivement en 3 et 4 classes).....	78
Illustration 54 : Urbanisation de terres agricoles et de zones naturelles (% de la zone d'étude) entre 1990 et 2000, et 2000 et 2006. Données CLC.	79
Illustration 55 : Variation des surfaces urbanisées par commune (ha) entre 1990 et 2000 et 2000 et 2006. Données CLC	79
Illustration 56 : Cartographie de l'indice relatif de risque (Occupation du sol DRAAF LR 2009).....	81
Illustration 57 : Limites de la Zone de Sauvegarde Exploitée (ZSE) et bassin hydrogéologique en régime anthropisé de l'aquifère karstique du Lez.....	84
Illustration 58: Débits et variations piézométriques en condition de karst saturé et sous saturé consécutifs à un épisode de pluie d'environ 120 - 130 mm	88
Illustration 59 : schéma de fonctionnement hydrologique lors d'une pluie selon le remplissage initial du karst : (a) karst très peu rempli, (b) karst faiblement rempli, (c) karst plein	89
Illustration 60 : Hydrogrammes simulés et observés à Lavalette pour les 6 événements majeurs de la base de données, les critères de qualité de la simulation y sont précisés (Nash)	91
Illustration 61 : Abaque n° 1 - Pluie / niveau du karst.....	94

Illustration 62 : Abaque n° 2 - Débit du pic de crue horaire à Lavalette / cumul des précipitations efficaces. Les courbes relient les résultats de simulations d'épisodes d'intensités similaires (figurés par des croix). Les losanges et triangles représentent des événements réels.	95
Illustration 63 : Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de septembre 2005 sur un karst sous saturé.	96
Illustration 64 : Zone du Lez modélisé sous SIC	98
Illustration 65 : Impact moyen du laminage sur le débit et la cote de l'eau pour 5 gammes de débit. Le barrage du Moulin de l'Evêque sépare la partie amont de la partie aval.	99
Illustration 66 : Exemple d'abaque (à l'Hotel de Région) donnant les cotes atteintes en fonction du débit amont (au Moulin de Gasconnet) ainsi que les incertitudes liées à la forme de la crue	101
Illustration 67 : Anomalies moyennes mensuelles de température (a) et de précipitations (b) entre le présent et le futur pour chaque scénario climatique, en moyenne de tous les scénarios et en courbe enveloppant les valeurs minimales et maximales des anomalies pour chaque mois, tous scénarios confondus, sur le bassin hydrogéologique du Lez.....	104
Illustration 68 : Synthèse des débits de prélèvements (mensuels et annuels) à la source du Lez.....	105
Illustration 69 : Evolution du débit de pompage journalier à la source du Lez en 2010	106
Illustration 70 : Caractéristiques des scénarios de pompage utilisés dans les modélisations	107
Illustration 71 : Comparaison des scénarios de pompage Qp2 et Qp3 (39 Mm ³ /an)	107
Illustration 72 : hypothèses de prélèvements futurs à la source du Lez pour les besoins AEP selon le SDAEP 2030	108
Illustration 73 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Traits pleins bleus : scénario de référence = climat présent [1971-2000] et prélèvement médian actuel [33 Mm ³ /an = Qp0]. Traits pointillés rouges : climat futur [2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm ³ /an = Qp0]. Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle. La limite 35 mNGF correspond au niveau d'eau minimum autorisé par le Déclaration d'Utilité Publique.	109
Illustration 74 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Traits pleins bleus : scénario de référence = climat présent [1971-2000] et prélèvement médian actuel [33 Mm ³ /an = Qp0]. Traits pointillés roses : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [40,4 Mm ³ /an = Qp5]. Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle. La limite 35 mNGF correspond au niveau d'eau minimum autorisé par le Déclaration d'Utilité Publique.	110
Illustration 75 : Dispersion des fréquences d'occurrences du niveau piézométrique calculées à l'aide des modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent), pour 2 intervalles de niveau	

piézométrique distincts « 45-35 m NGF et <à 35m NGF». Les fréquences d'occurrence sont calculées en considérant le nombre total d'occurrences journalières sur les périodes considérées([1971-2000] et [2046-2065]). La tranche d'eau < 35 mNGF est en-dehors de la gamme de calibration et validation du modèle.	111
Illustration 76 : Dispersion des fréquences d'occurrences du niveau piézométrique calculées à l'aide des modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent), pour 2 intervalles de niveau piézométrique distincts « <à 20 m NGF et < à 10m NGF». Les fréquences d'occurrence sont calculées en considérant le nombre total d'occurrences journalières sur les périodes considérées([1971-2000] et [2046-2065]). Ces tranches d'eau sont en-dehors de la gamme de calibration et validation du modèle.	112
Illustration 77 : Dispersion des fréquences d'occurrences pour lequel le débit de débordement à la vasque est nul ($Q_d \leq 0$ l/s) calculée à l'aide des 9 modèles hydroclimatique en considérant les scénarios 1, 2, 3, 4,5 et 6, les scénarios avec Qp2 et Qp3 à 39 Mm ³ /an et le scénario de référence (représentation en diagramme « Box-Plot »).....	113
Illustration 78 : Synthèse des principaux résultats de l'évaluation de l'impact de changement global (climatique et prélèvement) en relatif par rapport au scénario de référence.....	114
Illustration 79 : évolution temporelle des niveaux d'eau simulés dans le drain karstique et des débits de pompages correspondant aux scénarios a, b, c et d	116
Illustration 80 : synthèse des rabattements simulés et des volumes de sollicitation calculés en fin de simulation des scénarios de remontée a, b, c et d.	116

1. Introduction

Les aquifères karstiques constituent des réservoirs d'eau souterraine importants pour faire face aux besoins croissants en eau, liés notamment à l'augmentation démographique de la région Languedoc Roussillon, tout particulièrement sur le littoral et au sein de ses métropoles. Dans les aquifères karstiques de type vaclusien, une « gestion active » permet d'exploiter de manière optimale la ressource en eau souterraine, en s'affranchissant des effets négatifs des fortes variations de débit des sources. Il s'agit de pomper, en saison sèche, à un débit très supérieur au débit d'étiage, afin de solliciter les réserves que renferment ces aquifères, tout en maintenant un débit réservé dans le fleuve. Ces réserves aquifères se reconstituent ensuite au cours de la saison des pluies suivantes avec, pour conséquence une possible diminution de l'intensité des crues au début de la saison des pluies. Une gestion multi-usages de tels aquifères est donc susceptible de répondre de manière intégrée à ces problématiques en apparence antagonistes : besoins supplémentaires en eau pour l'AEP, réduction des risques d'inondation et contribution à la préservation des milieux aquatiques.

L'hydrosystème du Lez, fleuve côtier dont la source d'origine karstique est exploitée par une gestion active depuis 1981 par la ville de Montpellier puis l'Agglomération de Montpellier, constitue donc un site de référence pour étudier, dans le cadre d'une étude pluridisciplinaire (géologie, hydrogéologie, hydrologie, hydraulique, biologie et chimie), les possibilités d'une gestion multi-usages.

Le projet de recherche « Gestion multi-usages des aquifères karstiques méditerranéens – Le Lez, son bassin versant et son bassin d'alimentation » regroupe un partenariat scientifique et technique constitué par le BRGM qui en assure la coordination, ainsi que les UMR HydroSciences Montpellier (HSM), G-EAU, TETIS, le CERFACS et BIOTOPE. Il bénéficie du soutien financier de l'Agglomération de Montpellier, de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, du Conseil Général de l'Hérault. Les objectifs généraux de ce projet sont de :

- parfaire la connaissance du milieu karstique d'un point de vue géologique et du point de vue de ses propriétés hydrodynamiques à l'échelle de l'ensemble de son bassin d'alimentation (aspect multi-échelle) ;
- réévaluer la ressource en eau exploitable au sein de l'aquifère et caractériser les impacts éventuels de nouveaux scénarios d'exploitation ;
- évaluer la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère karstique et la confronter à des analyses hydrochimiques (traceurs émergents) et proposer sur cette base des recommandations en termes d'aménagement du territoire ;
- caractériser le régime hydrologique du fleuve côtier Le Lez et mieux évaluer d'une part l'aléa inondation associé aux hautes eaux et d'autre part la qualité du milieu hydrologique, notamment en basses eaux ;
- produire un inventaire et un état des lieux de la biodiversité souterraine de l'aquifère du Lez, cartographier les espèces de mollusques stygobies ;
- déterminer des bio-indicateurs basés sur la qualité de l'eau des eaux de surface et des eaux souterraines et sur la microfaune des eaux souterraines et du sous-écoulement ;
- étudier les effets de la gestion active actuellement menée sur la diminution des crues et simuler ce qu'elle pourrait être dans le futur à partir de modèles hydrauliques, hydrologiques et hydrogéologiques.

Le projet se décline sous la forme de sept ateliers (AT0 à AT6) dont les objectifs et les coordinateurs sont mentionnés ci-après (Illustration 1).

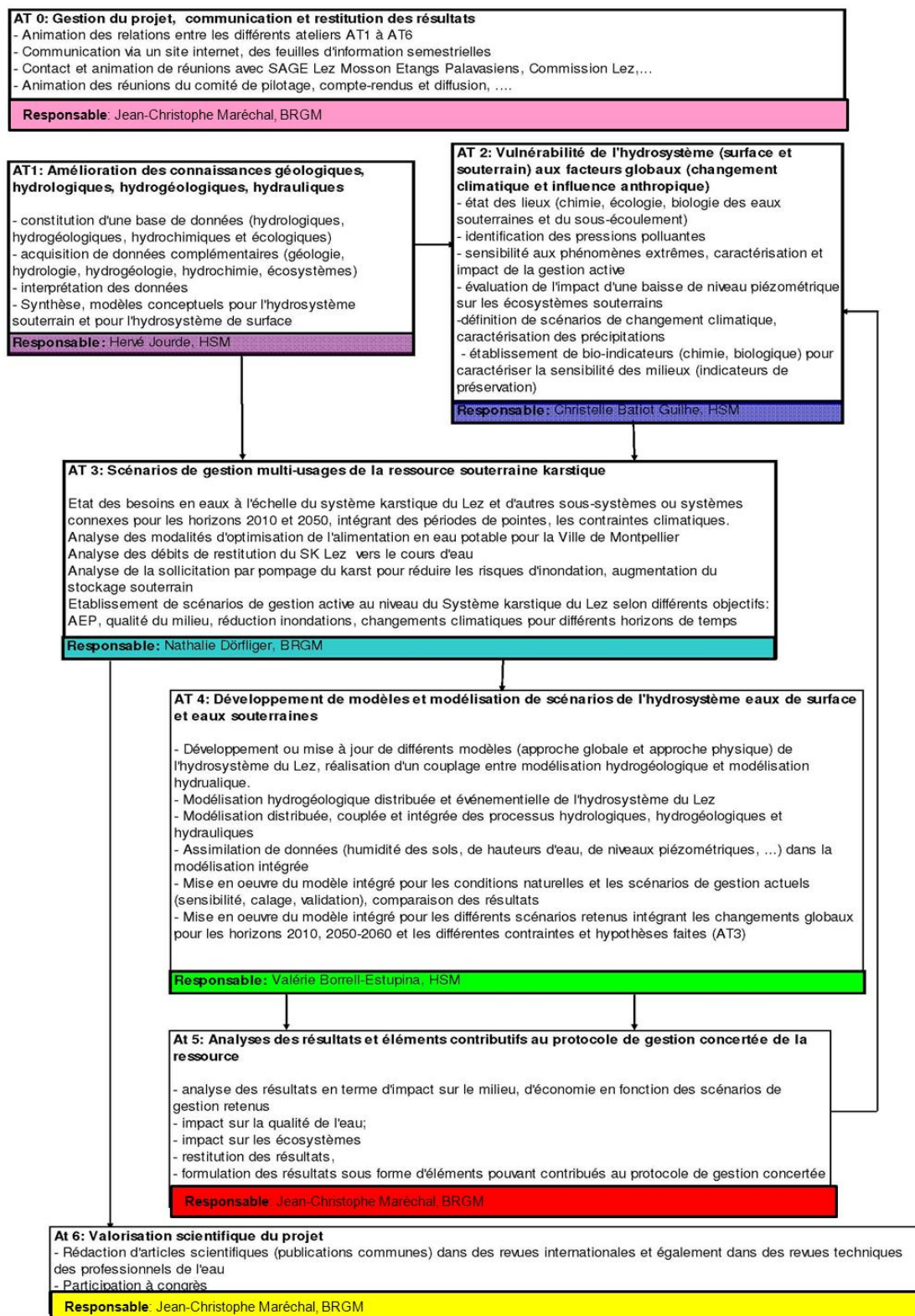


Illustration 1 : Structure du projet Lez-GMU à son démarrage avec les sept ateliers (AT0-AT6)

Le présent rapport constitue la synthèse des principaux résultats de ce projet. Ils sont présentés sous la forme de petits chapitres résumant les points mis en évidence dans les précédents rapports des différents ateliers techniques:

- atelier 1 - Rapport BRGM/RP-60041-FR : Jourde H., Dörfliger N., Maréchal J.C., Batiot-Guilhe C., Bouvier C., Courrioux G., Desprats J.F., Fullgraf T., Ladouche B., Leonardi V., Malaterre P.O., Prié V., Seidel J.L. (2011) Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Synthèse des connaissances récentes et passées, Rapport BRGM/RP-60041-FR, 355 pp, 5 ann ;
- atelier 1 - Rapport BRGM/RP-61612-FR : Leonardi V., Jourde H., Maréchal J.C. (2012) – Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Résultats complémentaires des forages et traçages. Rapport BRGM/RP-61612-FR, 52 p., 24 ill., 1 ann ;
- atelier 2 - Rapport BRGM/RP-61013-FR : Batiot-Guilhe, C., J.L. Seidel, B. Ladouche, V. Prié, F. Cernesson, N. Dorfliger, M. Blanc, J.C. Maréchal, V. Léonardi, P.Y. Vion. (2014). Projet de gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez – Caractérisation hydrochimique ; qualité chimique, vulnérabilité de l'hydrosystème et de l'écosystème associé. Rapport BRGM/RP-61013-FR, 294 pages, 17 annexes ;
- atelier 4 - Rapport BRGM/RP-60222-FR : Borrell Estupina V., Maréchal J.-C., Coustau M., Fleury P., Jourde H., Kong A Siou L., Ladouche B., Malaterre P.-O., Mazzilli N., Ricci S. (2012) Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Modèles numériques de fonctionnement de l'hydrosystème, Rapport BRGM/RP-60222-FR, 253 pp., 113 fig., 32 tab., 2 ann ;
- atelier 4 - Rapport BRGM/RP-61050-FR: Maréchal J.-C., Borrell-Estupina V., Caballero Y., Cernesson, F., Fleury P., Jay-Allemand M., Ladouche B., Malaterre P.-O. (2012) Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez– Simulations numériques de différents scénarios de changements globaux, Rapport BRGM/RP-61050-FR, 235 pp., 157 ill., 13 tab., 2 ann.

Ces résultats sont présentés à l'échelle de l'hydrosystème du Lez quant à sa structure et son fonctionnement (§ 2). Ensuite, un zoom décrit la source du Lez et son exploitation (§ 3). Les problématiques de qualité de l'eau, faune stygobie et de vulnérabilité du réservoir sont ensuite abordées (§ 4). L'impact de l'exploitation de l'aquifère karstique sur les crues est étudié et un outil de prévision proposé (§ 5). Des scénarios d'exploitation future couplés à des modèles de changement climatique sont simulés (§ 6). Des recommandations sont régulièrement énoncées sous la forme d'encadrés grisés. Elles constituent des éléments de base pour le maître d'ouvrage afin d'améliorer la gestion active de ce système karstique. En tête de chaque chapitre ou sous-chapitre, il est fait référence au rapport dans lequel le lecteur pourra trouver plus de détails sur la description des méthodes mises en œuvre ainsi que sur les résultats acquis durant le projet Lez-GMU.

2. Structure et fonctionnement de l'hydrosystème Lez

2.1. CADRE GENERAL DE L'AQUIFERE DU LEZ

Référence : rapports BRGM/RP-60041-RP et BRGM/RP-61612-FR

Le réservoir de l'aquifère du Lez se caractérise par des calcaires très fracturés et karstifiés, déposés lors du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur. Les limites de cet hydrosystème se définissent de façon générale à l'Ouest par la vallée de l'Hérault, au Nord-Ouest par la faille des Cévennes, au Nord-Est par le Vidourle, à l'Est par le bassin d'effondrement oligocène de Sommières et au Sud par le pli de Montpellier. Le bassin hydrogéologique de la source du Lez et la zone d'influence des captages du Lez seront abordés plus tard.

La présence de grands accidents (faille des Matelles-Corconne, faille du Lez, faille de Saint Clément) confère à ce système une typologie de « karst barré » permettant la mise en fonctionnement de sources de débordement telles que la source du Lirou et la source du Lez. La faille majeure des Matelles-Corconne joue un rôle important en matière de structure et fonctionnement de l'aquifère du Lez (Illustration 2):

- au Nord-Ouest de cette faille (et au sud du Pic Saint Loup), le réservoir est à l'affleurement permettant une recharge directe de l'aquifère par les précipitations : l'aquifère est libre dans cette zone ;
- au Sud-Est de cette faille, le réservoir est sous couverture des marnes imperméables valanginiennes (Crétacé inférieur) sur lesquelles se surimposent par endroit des formations calcaires et conglomératiques du Tertiaire : l'aquifère est captif, le réservoir étant à plusieurs centaines de mètres de profondeur mais affleurant également par endroit par le jeu de failles, telles que la faille du Lez où se situe l'exutoire principal des eaux de l'aquifère (source du Lez) ;
- au Nord-Ouest de cette faille (et au Nord du Pic Saint Loup), le réservoir est également sous couverture des formations marneuses imperméables et des calcaires valanginiens (Crétacé inférieur) du Causse de l'Hortus qui confèrent à l'aquifère un comportement captif.

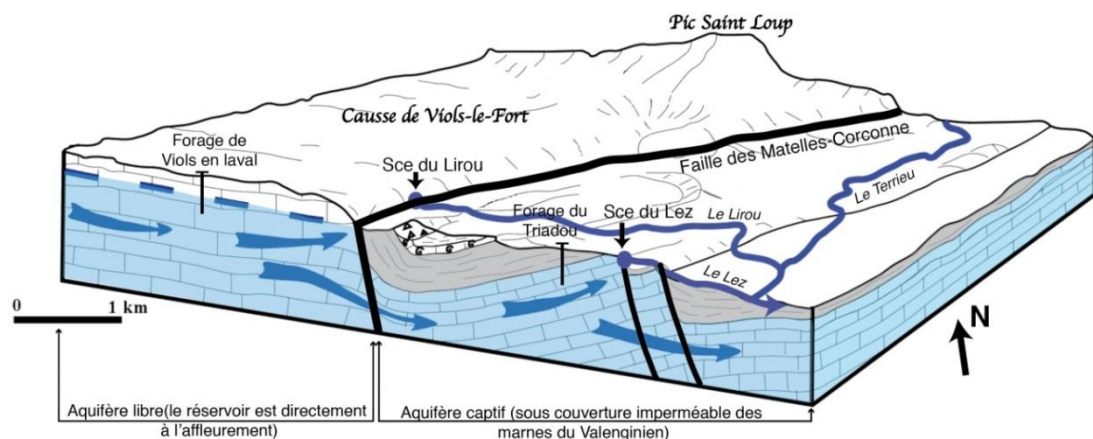


Illustration 2 : Bloc diagramme permettant de visualiser les parties libres et captives de l'aquifère du Lez. La zone saturée de l'aquifère est représentée en bleu clair et les formations imperméables apparaissent en gris clair (modifié d'après Drogue, 1964)

2.2. GEOLOGIE DU SECTEUR DU LEZ

Référence : rapport BRGM/RP-60041-FR

2.2.1. Coupes géologiques

Huit coupes interprétatives de toute la couverture sédimentaire secondaire, tertiaire et quaternaire reposant sur le socle d'âge primaire ont été réalisées ; elles sont reportées sur la figure ci-dessous (Illustration 3). Ces coupes sont sériées afin de rendre compte du mieux possible les objets géologiques, de tous types et de toutes tailles, dans les trois dimensions spatiales. Cinq coupes recoupent la zone transversalement et sont de direction NW-SE (Illustration 3). Elles mesurent chacune entre 30 et 60 kilomètres de long. Trois sont longitudinales à la zone de direction SW-NE et mesurent entre 50 et 60 kilomètres.

Ces coupes ont été réalisées en prenant en considération l'ensemble des éléments disponibles. Elles tentent de traduire les géométries créées au cours de l'histoire tectono-sédimentaire de la région du Languedoc. Pour chacune des huit coupes présentées, le lien entre structures géologiques et hydrogéologie à l'échelle considérée a été rappelé, ainsi que les conséquences de la géologie sur l'hydrogéologie et la vulnérabilité de l'aquifère (Jourde et al. 2011).

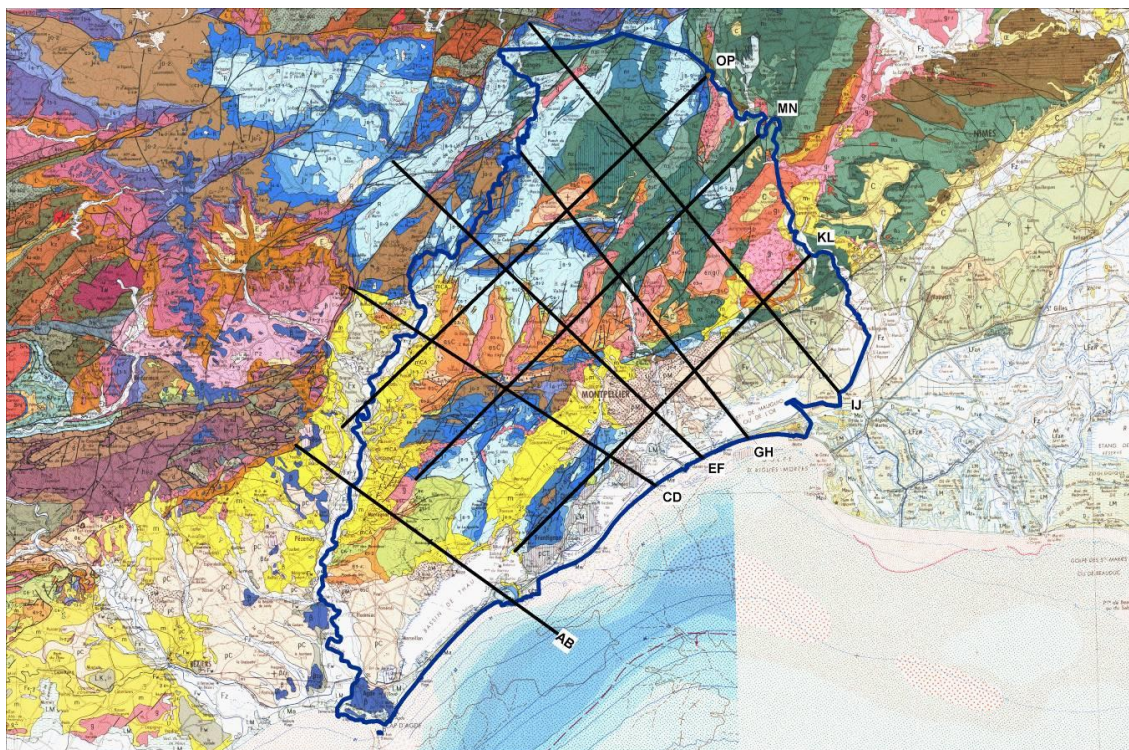


Illustration 3 : Carte de localisation des coupes sériées

Ces huit coupes sur la zone du système karstique du Lez traduisent une géométrie structurale complexe. La structure actuelle est le reflet de l'importante histoire géologique qui a affecté la région d'étude. La géométrie des coupes permettra de construire un modèle 3D, utile pour visualiser les formations aquifères et affiner le modèle conceptuel de l'aquifère karstique du Lez.

Des structures assez atypiques comme par exemple des synclinaux sur rampes ou des pieds de poussée gravitaire sont présents. De nombreux accidents tectoniques affectent la couverture et/ou le socle, et ont contribué soit pendant la phase compressive, soit pendant la phase distensive à faire évoluer cette géométrie.

On peut aussi appréhender, en étudiant ces coupes, l'histoire sédimentaire de la région à partir des dépôts évaporitiques du Trias. On remarque, d'un point de vue général, que les dépôts-centres ont évolué géographiquement au cours de cette histoire et que certaines séries comme le Portlandien ont des profils de dépôts faisant varier de plusieurs centaines de mètres les épaisseurs de ces formations selon leur localisation.

D'un point de vue hydrogéologique, des connections directes entre les aquifères reconnus du Jurassique supérieur, du Bathonien et du Lias calcaire sont possibles au droit de grands accidents. La couverture tertiaire, à part quelques horizons calcaires, contribue à cause de sa nature plutôt marneuse, à mettre les horizons aquifères en position captive. A l'inverse, là où elle n'est pas présente, par un manque de dépôt ou du fait de l'érosion les formations aquifères affleurent, l'aquifère est ainsi libre.

Les principaux enseignements hydrogéologiques de ces coupes par rapport à l'hydrosystème du Lez sont décrits ci-dessous, coupe par coupe :

coupe AB : Sur cette coupe la seule partie aquifère en liaison probable avec le système du Lez se trouve dans les séries karstiques jurassiques du bassin de l'Hérault. Elles peuvent s'enfoncer jusqu'à presque 2000 mètres de profondeur ;

coupe CD : Au nord et au sud du pli de Montpellier, on retrouve les mêmes formations aquifères que celles associées au système karstique du Lez, à l'affleurement ou sous couverture miocène comme dans le cas du bassin de Montbazin. Peu de connections hydrauliques sont supposées entre la partie Nord du pli de Montpellier et sa partie sud ;

coupe EF : Les formations aquifères associées au système karstique du Lez sont représentées principalement sur la partie NW de la coupe avec l'épaisse série des calcaires dolomitiques du Dogger et les calcaires massifs du Tithonien. Peu de connections hydrauliques supposées avec le Lias calcaire sont visibles sur cette coupe, mis à part au niveau de la faille n°2, dont le jeu aurait potentiellement permis la connexion directe des deux horizons aquifères ;

coupe GH : On peut observer sur cette coupe, que la source du Lez n'est pas située à l'aplomb de l'ancienne zone de récif qui se situe à une dizaine de kilomètres au NW. Cependant, elle se trouve au niveau d'une zone caractérisée par une importante déformation, au vu du nombre de failles présentes, et par des terrains aquifères, notamment du Jurassique supérieur ;

coupe IJ : Les formations aquifères sont pratiquement entièrement sous couverture, à l'exception des calcaires massifs affleurant sur le bois de Monnier. Les accidents des bassins d'effondrement permettent probablement de mettre en contact direct les séries du Jurassique supérieur avec celles du Bathonien dolomitisé et de la même façon ces dernières avec les horizons du Lias calcaire ;

coupe KL : On voit, contrairement à la coupe EF, que la source du Lez est associée à un aquifère important en termes de puissance des formations. La zone où se sont accumulés près de 700 mètres de calcaires massifs Portlandien, correspond à la zone aquifère associée à la source du Lez. D'autre part, on peut supposer que les jeux de failles normales favorisent les connections entre les trois horizons aquifères que sont le Jurassique supérieur, le Dogger dolomitique et le Lias calcaire ;

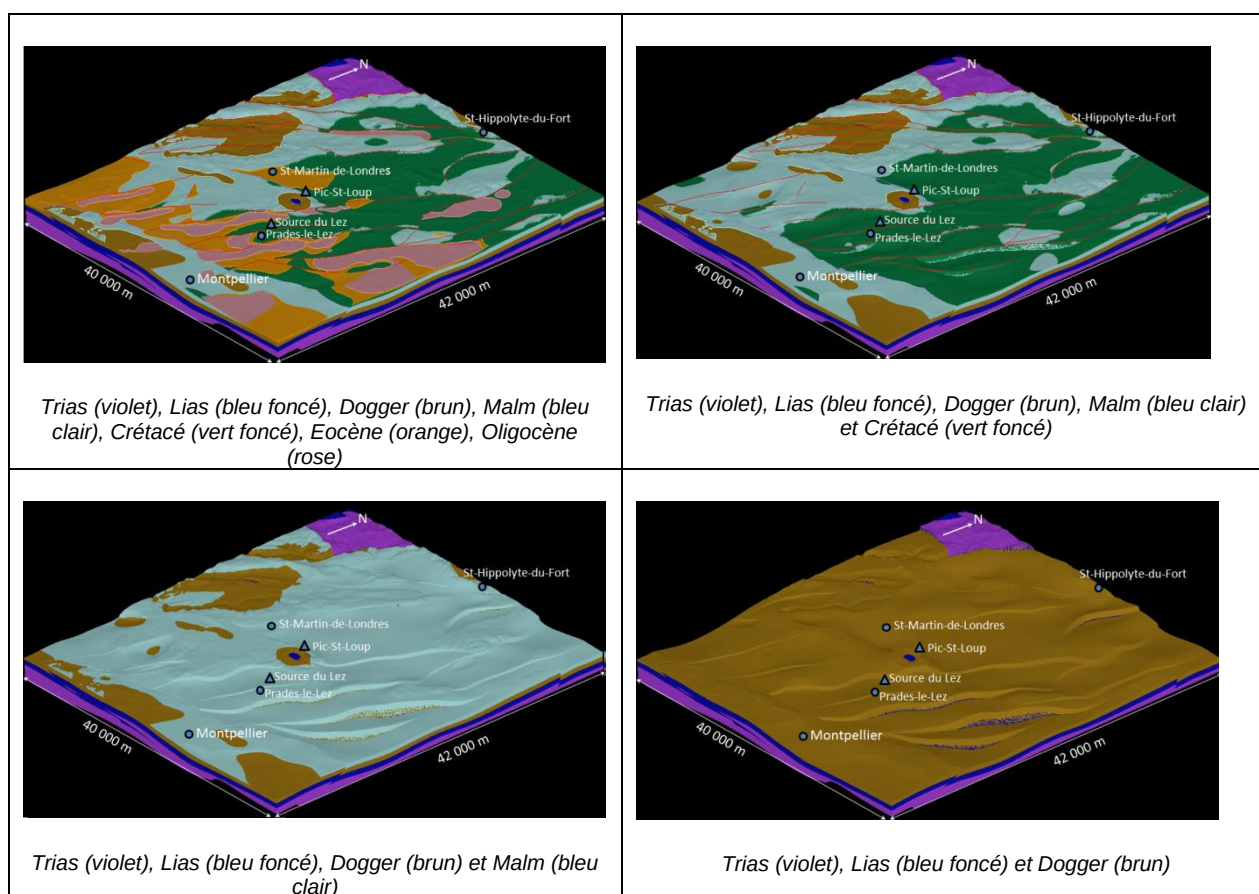
coupe MN : On traverse, le long de cette coupe, une épaisseur considérable de Dogger et donc de Bathonien dolomitique. La puissance totale du Dogger est de 800 mètres sur la carte paléogéographique correspondante. L'emprise de la zone de récif

au Tithonien passe à proximité de Viols-le-Fort, mais seule la formation de cet imposant anticlinal a permis une érosion de ces terrains aquifères, comme en témoignent les affleurements des séries dolomitiques. Il est difficile d'imaginer, au droit des accidents structuraux, des connections directes entre les différentes couches aquifères ;

coupe OP : cette coupe ne traverse pas réellement l'aquifère karstique de la source du Lez, excepté au niveau du bassin de Sommières. Les terrains néanmoins aquifères du massif de la Gardiole et sous le bassin de Montpellier ne sont pas en relation avec le système karstique du Lez, à cause de la présence du pli de Montpellier.

2.2.2. Modèle géologique tridimensionnel

Cette étude a constitué une première ébauche de modélisation 3D de la géologie autour de l'aquifère du Lez (Illustration 4). Les données utilisées ont permis de réaliser un modèle d'échelle régionale. Les problèmes de cohérence, précision, et localisation des coupes utilisées lors de la modélisation nous conduisent à suggérer que des conclusions hydrogéologiques poussées devraient être faites sur la base d'un modèle plus détaillé. Le modèle actuel devrait donc servir de version 0 servant à être critiquée puis améliorée.



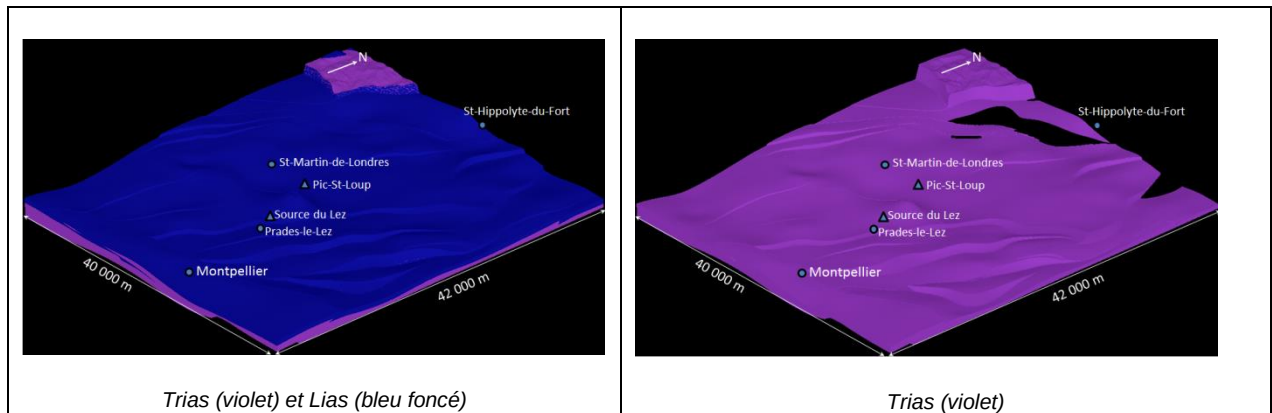


Illustration 4 : Modèles géologiques 3D de la zone d'étude avec empilement progressif des divers entités stratigraphiques

Au sujet du fonctionnement de l'aquifère karstique du Lez dans l'espace, nous ne pouvons, aujourd'hui, formuler que des hypothèses. En effet, en milieu karstique, les hétérogénéités lithologiques et les discontinuités structurales sont à l'origine du cloisonnement et de la compartimentation des réservoirs, aussi bien sur le plan vertical qu'horizontal. C'est l'existence de ces deux types de discontinuités qui est à l'origine de la compartimentation de l'aquifère karstique en plusieurs unités hydrogéologiques qui sont plus ou moins indépendantes les unes des autres.

Le système karstique du Lez est donc schématiquement représenté par un ensemble de blocs séparés, considérés comme homogènes et reliés entre eux par des discontinuités aboutissant au réseau karstique. Les relations entre chacune des unités à l'intérieur du réservoir vont dépendre du rôle hydrogéologique des accidents majeurs et de la capacité de drainage des fractures et des fissures qui aboutissent au réseau.

La synthèse géologique de la zone autour du Lez (Cordonnier, 2010) apporte toutefois de nouvelles informations sur les géométries structurales et sédimentaires des formations qui composent cet ensemble (Illustration 5).

- Dans un premier temps il ressort que les différentes couches qui composent la couverture sédimentaire ne sont pas uniformément de même épaisseur. Des épaisseurs importantes de sédiments se retrouvent en particulier au niveau des zones basses. Ces pièges à sédiments n'ont cessé d'évoluer géographiquement et ont permis un empilement complexe de ces différents dépôts. A l'inverse des nombreux modèles isopaques, finalement, parfois très loin de la réalité, comme l'atteste des informations obtenues au niveau des forages profonds.
- Dans un second temps, il s'est dégagé naturellement que de nombreux accidents acquis lors de l'orogénèse pyrénéenne ont été réactivés lors de l'effondrement de cette chaîne et de l'ouverture du golfe du Lion. Des grands accidents de socle (marches ou chevauchements de socle) sont le plus souvent à l'origine de ces structures affectant la couverture. Certains, comme le pli de Montpellier, la faille des Matelles-Corconne ou la faille des Cévennes paraissent être plus importants que d'autres. Ils jouent un rôle hydraulique prépondérant dans le système du Lez.
- Le remplissage Crétacé-Tertiaire, plutôt marneux, a permis aux calcaires karstifiés, devenus aquifères, d'être localement sous couverture imperméable. Ainsi, plus de la moitié de l'aquifère du Lez est un aquifère captif (cf. illustration n° 6).

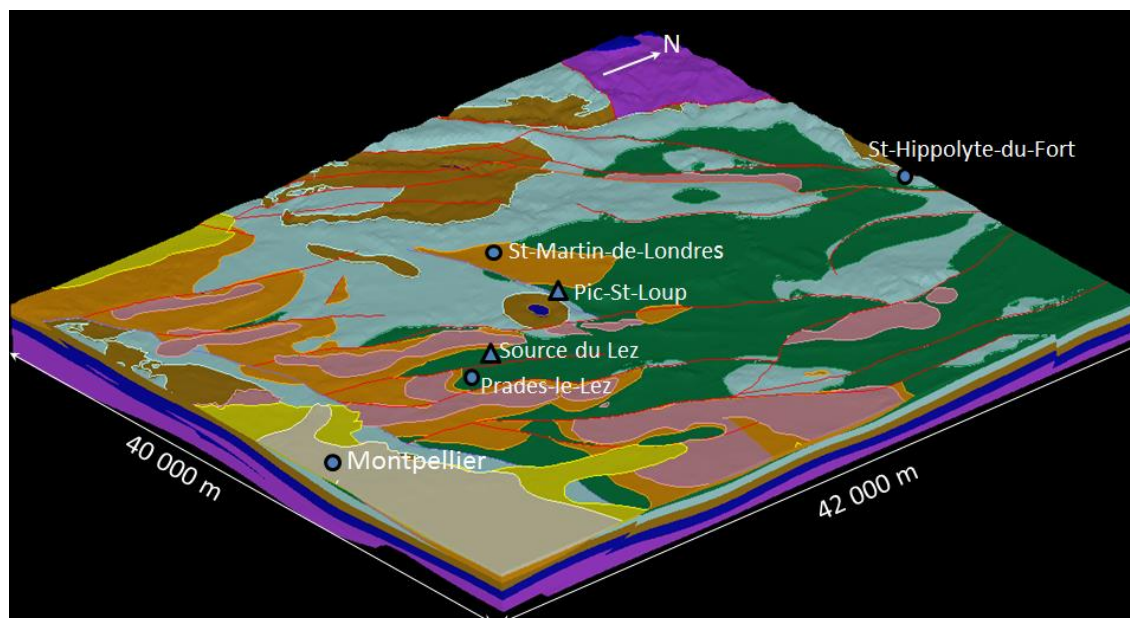


Illustration 5 : Modèle 3D de la zone d'étude avec toutes les unités géologiques – Trias (violet), Lias (bleu foncé), Dogger (brun), Malm (bleu clair), Crétacé (vert foncé), Eocène (orange), Oligocène (rose), Miocène (jaune), Pliocène (beige)

2.2.3. Tectonique et karstification

Dans la région nord-montpelliéraine, depuis le Jurassique jusqu'au Miocène, les phases de karstification sont toutes concomitantes avec des périodes d'activité tectonique majeures, à l'origine d'une importante fracturation des massifs carbonatés. Ces différentes phases tectoniques sont associées à des directions d'extension ou de compression qui vont permettre l'ouverture ou la fermeture de ces fractures. Afin d'identifier les fractures ayant permis des circulations d'eau à l'origine des premières dissolutions du massif carbonaté, des analyses statistiques de la fracturation et du réseau karstique actuel ont été réalisées. Parallèlement à cela, ont été caractérisées, pour chaque phase tectonique, les familles de fractures préférentiellement ouvertes.

Cette analyse statistique (Illustration 6) des réseaux de drain karstique est basée sur 80 plans topographiques de cavités du Causse de Viols le Fort, présentant 532 drains karstiques de longueur cumulée de 8,75 km (Archives du Club Spéléologique CLPA Hérault). Concernant la fracturation, celle-ci a été analysée à différentes échelles : 1:250 000 sur carte géologique, 1:25 000 sur photographies aériennes, et in situ, sur le site expérimental du Terrieu (2500 m²).

Ces analyses statistiques, réalisées à différentes échelles, mettent en évidence que (i) le réseau de karstification s'oriente principalement selon les axes NS et EW dans les zones peu soumises aux déformations d'origine tectonique, tandis que (ii) près des accidents majeurs, il s'oriente préférentiellement suivant la direction NE-SW.

La karstification EW a été initiée au Crétacé moyen par l'extension NS lors de l'ouverture de l'Isthme Durancien : cette direction d'extension a permis l'ouverture des fractures orientées EW, facilitant l'infiltration et la circulation d'eau dans celles-ci.

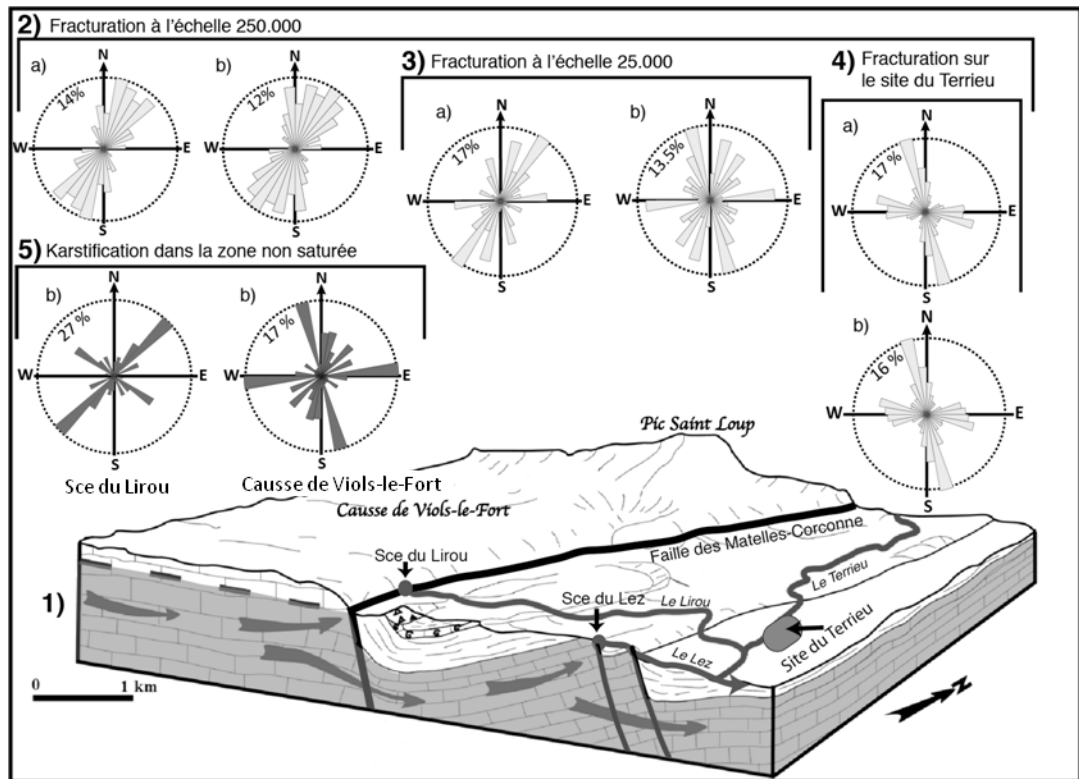


Illustration 6 : Blog diagramme de l'aquifère du Lez (1) et analyses statistiques de la fracturation à l'échelle 250.000ème (2), à l'échelle 25.000ème (3), in situ sur le site du Terrieu (4) ; ainsi que de la karstification en zone non saturée (5). Les analyses statistiques sont réalisées en longueur cumulée (a) ou en fréquence (b).

La karstification NS, clairement associée à un réseau de fractures conjuguées N150-170 et N010-020, a été initiée pendant l'orogénèse pyrénéenne. En effet, la compression NS associée à cette phase tectonique a engendré des fractures ouvertes conjuguées, favorisant ainsi les circulations suivant cette direction. Durant cette période, le gradient hydraulique régional étant successivement orienté SN puis NS, a favorisé également la karstification dans ces réseaux de fractures suivant cette direction.

Les grands accidents, telle que la faille des Matelles-Corconne, ont joué pendant ces différentes périodes tectoniques. Lors de l'ouverture du golfe du Lion (Oligocène), cette faille joue en faille normale, permettant la mise en contact des terrains aquifères jurassiques avec les terrains imperméables du Crétacé Inférieur. La zone endommagée autour de cette faille (près de 200 m de large) présente de nombreuses fractures sub-parallèles à l'accident majeur, qui se sont ouvertes pendant l'Oligocène ; le paléo-gradient hydraulique était alors perpendiculaire à cet accident. La présence d'un réseau karstique sub-parallèle à la faille des Matelles-Corconne peut ainsi s'expliquer par le contexte tectonique oligocène qui bloque les circulations de direction N140 suivant le gradient hydraulique et contraint les écoulements suivant la direction de la faille, facilitant ainsi la dissolution N045 dans les fractures ouvertes.

La mise en place de ce réseau karstique est donc une conséquence de l'activité tectonique à l'Oligocène, ce réseau se développant orthogonalement au paléo-gradient hydraulique local. La considération des différentes périodes de karstification a permis d'identifier et d'expliquer l'origine des directions préférentielles d'écoulements actuels dans les drains karstiques.

Deux résultats majeurs ressortent de cette étude :

- contrairement aux hypothèses classiquement admises, les directions préférentielles de dissolution ne sont pas nécessairement liées à la direction du gradient hydraulique. En effet, il est ici montré qu'à proximité d'un accident majeur, ce n'est plus le gradient hydraulique qui impose l'écoulement mais les conséquences d'une phase tectonique ;
- contrairement à ce qui est largement admis en milieu méditerranéen, la période qui contraint essentiellement la karstification des carbonates n'est pas le Messinien. En effet, cette étude montre que les périodes précoces sont celles qui ont réellement un impact prépondérant sur la karstification, puisqu'elles vont prédéterminer les directions d'écoulements souterrains qui vont ensuite se succéder jusqu'à l'actuel. La karstification pendant la crise messinienne sera importante, du fait d'un abaissement de plus de 1500 m du niveau de la mer Méditerranée (Clauzon et al. 2005, Audra et al. 2004, Mocochain et al. 2006), notamment en profondeur, mais elle restera guidée par les réseaux karstiques précoces qui se sont initiés du Crétacé jusqu'à l'Eocène.

Cette étude, qui démontre l'importance de la mise en place des karsts précoces sur les directions principales d'écoulement actuel, pourrait être extrapolée à d'autres karsts périméditerranéens ayant subi les mêmes phases tectoniques et périodes de karstification.

2.3. BASSIN HYDROGEOLOGIQUE DE LA SOURCE DU LEZ

2.3.1. Introduction

La définition des bassins hydrogéologiques et impluvium de la source du Lez nécessite de prendre en compte deux caractéristiques spécifiques de cet aquifère karstique. D'une part, la présence d'une partie du réservoir sous couverture moins perméable induit une différence entre le bassin hydrogéologique et l'impluvium. Par ailleurs, les cycles de pompages provoquant des rabattements au sein du conduit karstique et dans l'aquifère à l'aval de la source du Lez induisent une différence entre bassins hydrogéologiques de la source en régime naturel et en régime anthropisé (sous l'influence des pompages).

Ces notions de bassins sont schématisées à l'illustration 7. Le bassin hydrogéologique de la source du Lez correspond à l'étendue à l'intérieur de laquelle les écoulements d'eau souterraine convergent vers la source du Lez en période d'écoulement naturel. En période d'étiage, lorsque les pompages sont supérieurs au débit naturel de la source, le rabattement induit au sein du réseau de drains karstiques se propage vers l'aval. Il en résulte un bassin hydrogéologique qui s'étend à l'aval de la source (sud-est). Il correspond au bassin défini par Bérard (1983) qui s'étend jusqu'au Pli de Montpellier au sud (Illustration 12). L'impluvium, ou zone d'infiltration des eaux qui alimentent la source du Lez, est constitué par les secteurs dans lesquels l'aquifère du Lez est libre et peut donc être rechargé par les eaux d'infiltration (essentiellement là où affleurent les terrains d'âge Jurassique). A cela, s'ajoutent, sur la zone de couverture (Crétacé), les bassins versants des pertes qui collectent les eaux de ruissellement qui convergent vers les pertes, permettant une infiltration directe dans l'aquifère du Lez.

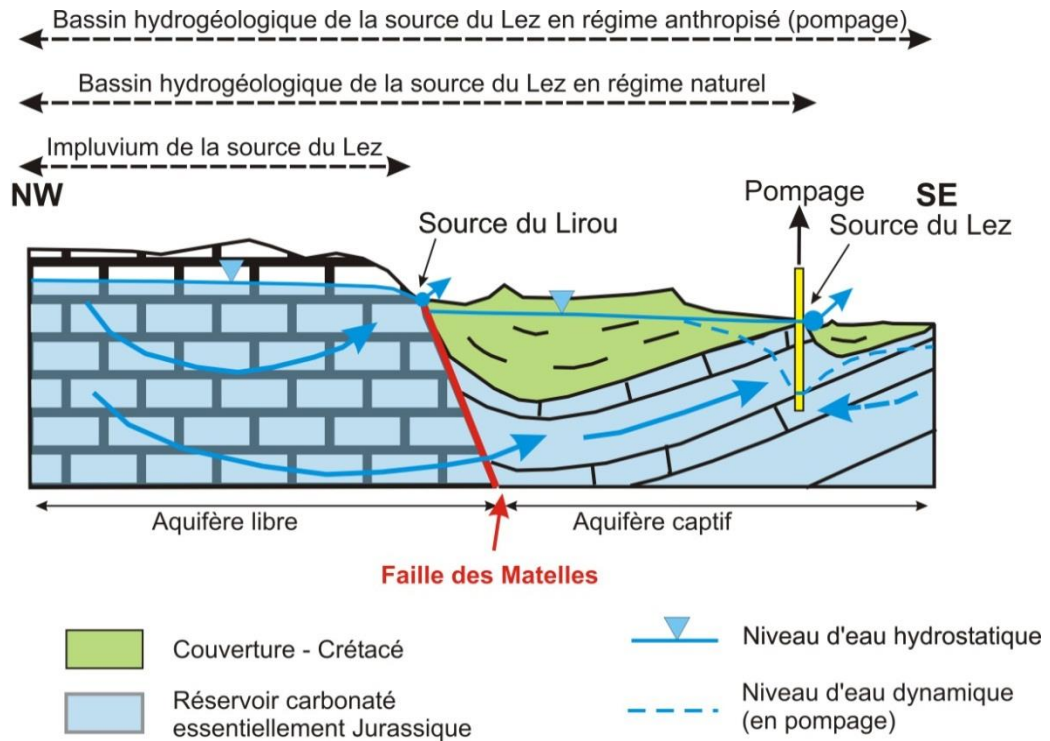


Illustration 7 : Coupe hydrogéologique schématique du système karstique du Lez avec distinction des bassins hydrogéologiques de la source en régime naturel et anthropisé (pompage) ainsi que de l'impluvium correspondant à la zone de recharge principale de l'aquifère (pour ce dernier, par simplification, les bassins des pertes ne sont pas schématisés).

2.3.2. Pertes et traçages artificiels

Référence : rapport BRGM/RP-61612-FR

Dans un aquifère karstique, la réalisation d'essais de traçages artificiels constitue un des moyens de préciser les limites du bassin hydrogéologique ainsi que la connexion des pertes (dont les bassins versants constituent une part de l'impluvium) avec l'exutoire principal. Dans les chapitres suivants, un bilan des traçages anciens et des nouveaux essais réalisés dans le cadre du projet Lez-GMU est établi.

Anciens traçages

Une synthèse critique des différents essais de traçages artificiels réalisés sur l'hydrosystème du Lez entre 1956 et 1977 a été réalisée d'après Paloc (1966, 1979a) et Durepaire (1985), complétée par quelques traçages récents notamment dans le cadre de l'étude hydrogéologique pour le projet de Lien routier (Illustration 8).

Traçage	Point d'injection	Point d'apparition	Confirmation
1	Siphon aval du grand Bouldou des Matelles	Event du Lirou	Avéré
		Source du Lez (?)	Incertain
2	Perte du Brestalou (Bouldou B2 du mas de Vedel)	Bouldou de Viala	Avéré
		Source du Lez	Avéré / Confirmé 2012
3	perte 1 du ruisseau d'artigues (Miral)	Source du Lez	Incertain
4	Perte du Yorgues (faille de Corconne)	Source du Lez	Avéré
5	perte du Lamalou (amont perte du Moulin du Rouet)	Source des Fontanilles	Avéré
		Source du Lez (?)	Incertain (peu probable)
6	Pertes du ruisseau de la Tourquille (Gornières)	Source du Lez	Incertain / Infirmé 2012
		Source des Fontanilles	Incertain / Infirmé 2012
7	Perte de Saint-Martin	Resurgence (source) des Chataigniers	Avéré
		Source des Fontanilles	Incertain
		Source du Lez (?)	Incertain (peu probable)
8	Grotte de la Fausse Monnaie	Source du Lez	Avéré / Confirmé 2010
9	Perte du ruisseau de Pouzet	Source du Lez ?	Incertain
		Source du Gour Noir ?	Incertain
		Source de la Fleurette ?	Incertain
		Source de Restinclières ?	Incertain
10	Perte du Thalweg à 200m de la source du Lez	Source du Lez	Avéré
11	Brestalou de Lauret	Source du Lez	Avéré
12	Terrieu en aval de Tréviers à 4,2 km de source du Lez	Source du Lez	Avéré
13	Terrieu en amont de Tréviers à 7,5km de source du Lez	Source du Lez	Avéré
14	Perte du Lirou (amont)	Source du Lez	Avéré
15	Perte du Lirou (aval)	Source du Lez	Avéré

Illustration 8 : Synthèse critique des traçages artificiels anciens. La colonne "Confirmation" comprend 4 degrés de qualification: Avéré, Incertain, Confirmé, Infirmé. Les qualificatifs « Avéré et Incertain » reposent sur les conclusions des traçages réalisés entre 1956 et 1977 (Avéré : traçage identifié visuellement à la source, Incertain : traçage identifié par charbon actif). Les qualificatifs « Confirmé et Infirmé en 2010/12 » reposent sur les conclusions des traçages réalisés entre 2010 et 2012.

La localisation de ces traçages est présentée sur l'illustration 9.

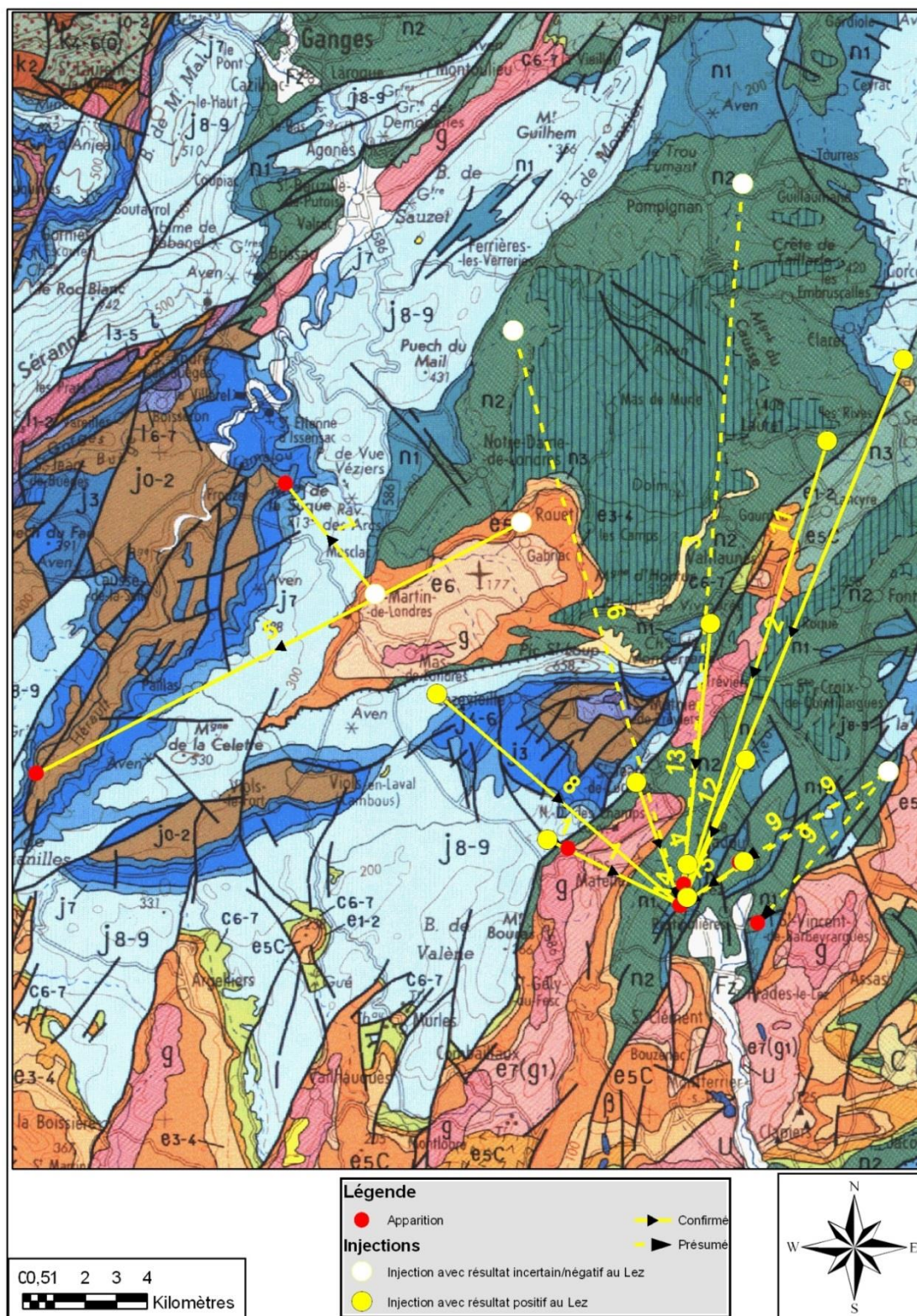


Illustration 9 : Extrait de carte géologique 1 : 250 000 (Ed. BRGM) avec position des traçages artificiels réalisés sur l'aquifère du Lez (trait plein : traçages avérés, trait pointillé : traçages incertains).

Nouveaux traçages (Lez-GMU)

Dans le cadre du projet Lez-GMU, cinq essais ont été réalisés, numérotés GMU 1 à GMU 5, dont les résultats sont synthétisés au sein de l'illustration 10.

Traçage	Points d'injection	Date et traceur	Points de suivi	R*	Commentaire
GMU 1	Aven de la Fausse Monnaie	20/04/2010 à 12h00 fluorescéine (4 kg)	Source des Fontanilles (fluorimètre)	(-)	Restitution > 50 % pour le cumul des deux sources
			Source du Lirou (fluorimètre)	(+)	
			Source du Lez (fluorimètre)	(+)	
GMU 2	Perte du Mas Martin	03/02/2011 sulforhodamine (5 kg)	Source du Lirou (fluorimètre)	?	Crue ayant entraîné un pic de fluorescence (lié à la turbidité ?) : le passage du traceur n'est pas validé par le spectrophotomètre en laboratoire
			Source des Fontanilles (fluorimètre)	?	
			Source du Lez (fluorimètre)	?	
			Source de Fontbonne (fluorimètre)	?	
GMU 3	Aven Roussière	17/02/2011 fluorescéine (5 kg)	Source du Lirou (fluorimètre)	?	Crue ayant entraîné un pic de fluorescence (lié à la turbidité ?) : le passage du traceur n'est pas validé par le spectrophotomètre en laboratoire
			Source des Fontanilles (fluorimètre)	?	
			Source du Lez (fluorimètre)	?	
			Source de Fontbonne (fluorimètre)	?	
GMU 4	Brestalou de Claret	22/05/2012 à 12h sulforhodamine (10 kg)	Source du Lez (fluorimètre)	(+)	Restitution > 70 %
GMU 5	Perte de la Tourquille (Gornies)	25/05/2012 à 19 h 30 fluorescéine (15 kg)	Source du Lez (fluorimètre)	(-)	
			Source des Fontanilles (fluorimètre)	(-)	

Illustration 10: Synthèse des cinq essais de traçages réalisés dans le cadre du projet Lez-GMU
(* R = Restitution, (+) = résultat positif, (-) = résultat négatif, ? = résultat non démontré)

Ils sont localisés sur l'illustration 11. Le traçage GMU 1 a permis de confirmer, à l'ouest, l'appartenance de l'Aven de la Fausse Monnaie au bassin hydrogéologique du Lez. Ainsi, ce traçage nécessite de placer la limite ouest du bassin hydrogéologique du Lez au Nord-Ouest de l'anticlinal qui affecte le flanc sud du Pic Saint Loup : cet anticlinal, reconnu jusqu'à présent comme une limite imperméable, n'agit donc pas comme tel sur le tracé entre l'Aven de la Fausse Monnaie et la source du Lez.

Au Nord, ces traçages confirment la connexion entre la perte du Brestalou de Claret et la source du Lez et semblent confirmer que les pertes de la Tourquille alimentent un autre exutoire (probablement situé dans la vallée de l'Hérault).

Synthèse

Les principales pertes présentes dans la zone d'étude sont localisées sur l'illustration 11. Sont distinguées, les pertes tracées antérieurement (résultat positif ou négatif/incertain au Lez), les pertes tracées dans le cadre du projet Lez-GMU (résultat négatif, positif ou incertain au Lez) et les autres pertes. L'analyse des anciens et nouveaux traçages permet de distinguer également des bassins de pertes pour lesquelles la connexion vers la source du Lez est confirmée par traçages, des zones de pertes pour lesquelles la connexion est incertaine. L'ensemble de ces secteurs seront considérés dans la délimitation de l'impluvium de l'aquifère ainsi que dans la cartographie de sa vulnérabilité (§ 4.4).

Recommandation :

Des pertes situées près de la source du Lez ou à proximité de la Faille des Matelles-Corconnes, suspectées d'être en connexion avec la source et où les résultats restent incertains, n'ont cependant pas été tracées. Afin de confirmer ou infirmer cette relation, il est recommandé d'effectuer des essais de traçages à partir de ces pertes avec pour ordre décroissant de priorité : la perte du Triadou (sur le Terrieu), la perte du Brestalou de Lauret (aval), la perte du ruisseau d'Artigues et l'Aven Vidal.

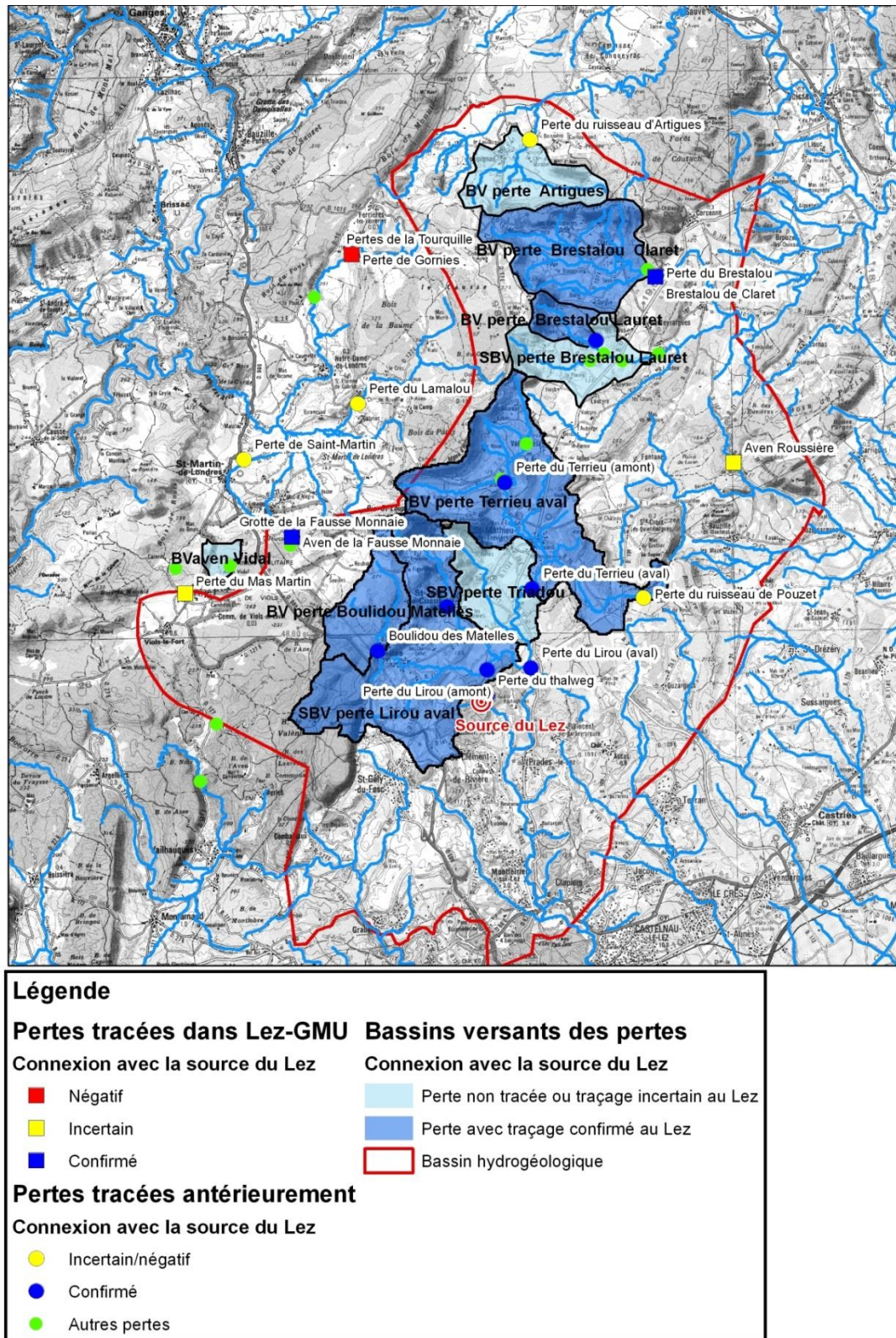


Illustration 11 : Carte des principales pertes, bassins des pertes et essais de traçages sur le bassin hydrogéologique en régime de pompage

2.3.3. Impluvium

L'impluvium de l'aquifère du Lez est cartographié à l'illustration 12 : il est composé de secteurs disjoints correspondant aux zones de calcaires affleurant (98,8 km²) et aux bassins versants des pertes (118 km²). Ce sont ces secteurs, d'une superficie totale de 188,1 km², dans lesquels l'eau qui s'infiltre s'écoule vers l'exutoire du Lez. Ce sont également les zones les plus vulnérables de l'aquifère (§ 4.4).

Les études de modélisation Tempo conduites dans le projet montrent que les bilans en eau à l'échelle de la source du Lez correspondent à une zone de recharge $S_{Tempo} = 115,5$ km² sur laquelle l'ensemble de la pluie disponible s'infiltre ($R = P_{eff}$). Cette contribution totale au système karstique se divise en deux secteurs : (i) le secteur des calcaires affleurant principalement jurassiques et karstifiés sur lesquels la totalité de l'eau disponible s'infiltre ($R = P_{eff}$) et (ii) les bassins versants des pertes (hors Aven Vidal) sur lesquelles seulement une partie de l'écoulement s'infiltre à la perte ($R = \alpha P_{eff}$), avec α le coefficient d'infiltration moyen annuel des pertes. La superficie totale de ces deux secteurs représente 177,4 km².

Le bilan total annuel s'écrit :

$$P_{eff}S_{Tempo} = P_{eff}S_{calc} + \alpha P_{eff}S_{bv}$$

où S_{Tempo} désigne la superficie de l'impluvium calculée par le modèle Tempo, S_{calc} désigne la superficie des calcaires affleurant avec un taux de karstification élevé (90,3 km²) et S_{bv} désigne la superficie des bassins versants des pertes hors affleurements calcaires karstifiés (177,4 – 90,3 = 87,1 km²).

L'équation précédente peut dès lors s'écrire :

$$P_{eff}115,5 = P_{eff}90,3 + \alpha P_{eff}87,1$$

La résolution de cette équation conduit à $\alpha = 28$ % d'infiltration des pertes. Cette valeur constitue une estimation moyenne annuelle d'un paramètre qui fluctue au cours de l'année en fonction des conditions hydrologique : le taux d'infiltration est élevé lorsque le niveau piézométrique est bas au sein de l'aquifère karstique et inversement. De même, lors d'un épisode de crue, ce coefficient d'infiltration sera plus faible qu'en période d'étiage.

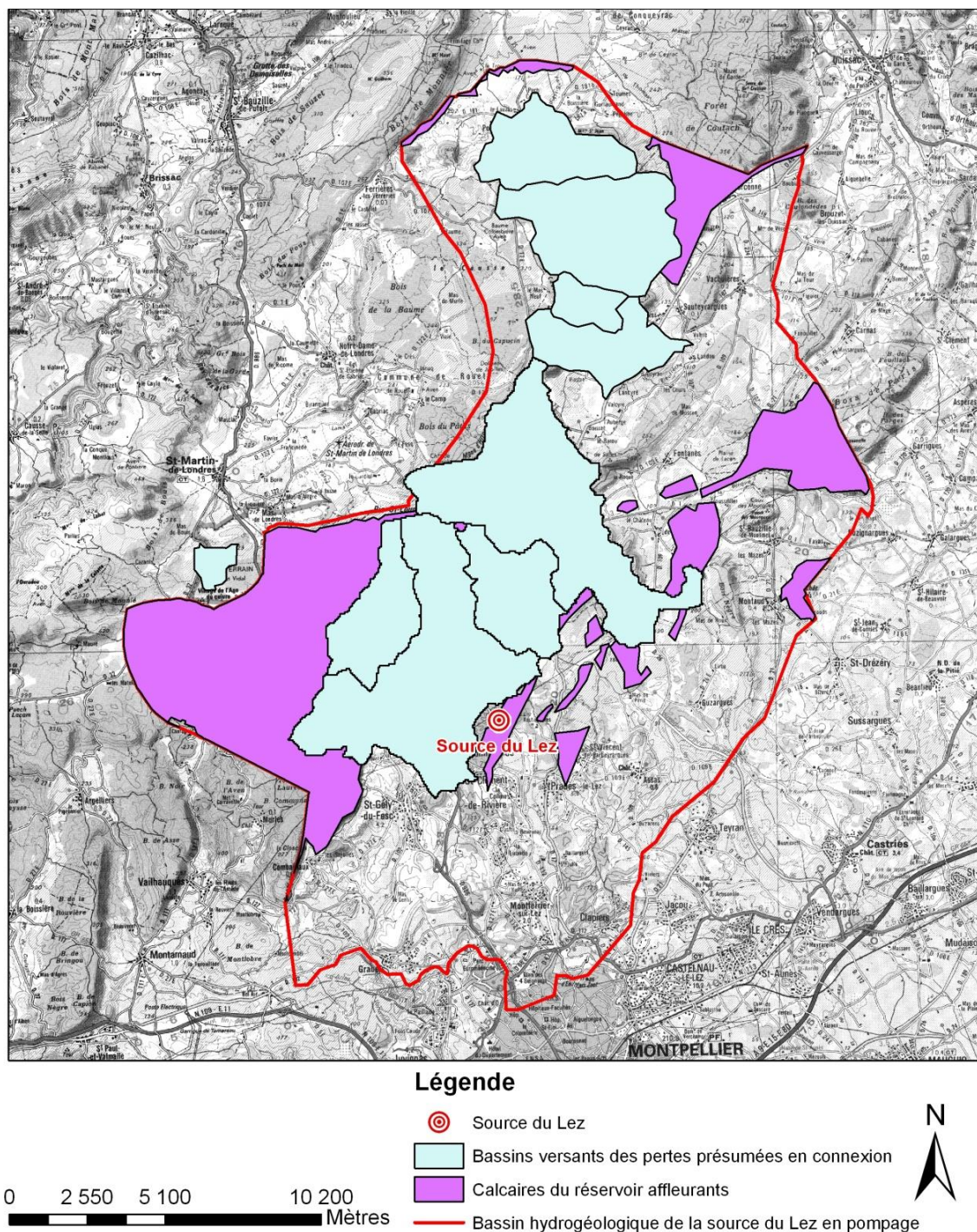


Illustration 12 : Limites de l'impluvium de l'aquifère du Lez et bassin hydrogéologique en régime de pompage

2.4. FORAGES COMPLEMENTAIRES

Référence : rapport BRGM/RP-61612-FR

Jusqu'à présent, aucun forage n'avait été implanté dans la zone sous couverture du bloc Sud-Est (à proximité de la source du Lez) de l'aquifère du Lez et très peu de forages sont présents sur le causse de Viols-le-Fort où l'aquifère affleure. Dans le

cadre de ce projet, trois forages de reconnaissance ont par conséquent été réalisés dans ces zones. Un suivi des niveaux d'eau a été mis en place afin d'améliorer la connaissance du fonctionnement de l'aquifère dans ces secteurs. Ces forages (Illustration 14) sont situés (i) à environ un kilomètre au Nord de la source du Lez (forage du Triadou) et (ii) au centre du causse de Viols-le-Fort (Forages de Viols-en-Laval, 1 et 2). La projection de ces forages sur le bloc diagramme de l'aquifère du Lez (Illustration 2) permet d'appréhender au mieux la zone explorée. Leurs caractéristiques sont synthétisées sur l'Illustration 13.

Forage	Code BSS	Altitude (m NGF)	Profondeur (m)
Triadou	09903X0152/TRIADO	92,21	333
Viols en Laval 1	09636X0188/FVL1	221,30	304
Viols en Laval 2	09636X0189/FVL2	238,87	280

Illustration 13 : Caractéristiques des forages complémentaires réalisés dans le cadre du projet Lez-GMU

Les forages de Viols en Laval ont été réalisés dans le Jurassique supérieur (Kimméridgien et Oxfordien), qui constitue pour partie l'aquifère du Lez (Illustration 2 et Illustration 14).

Le mur de l'aquifère du Lez (substratum imperméable) a été atteint en forant jusqu'aux formations de l'Oxfordien (calcaires marneux de couleur sombre). Ces formations à forte composante marneuse sont en effet considérées comme imperméables par comparaison aux formations calcaires du Kimméridgien très karstifiées et donc très perméables. D'après les logs lithologiques de ces forages, l'épaisseur moyenne du réservoir du Lez sur le Causse de Viols-le-Fort est de l'ordre de 225 m. Le mur de l'aquifère constitué par les formations calco-marneuses de l'Oxfordien est à une altitude de 10 mètres NGF.

Le premier forage (Viols-en-Laval 1) a recoupé quelques niveaux karstifiés dans la zone d'infiltration, un seul de ces niveaux ayant présenté une arrivée d'eau très faible (<0.5 l/s) vers 110 m de profondeur. Le niveau d'eau s'est stabilisé à 135 m de profondeur par rapport à la tête de forage, soit aux alentours de +85 m NGF. Ce niveau d'eau réagit aux précipitations et semble pouvoir être assimilé au niveau piézométrique de l'aquifère du Lez sur le Causse de Viols-le-Fort.

Le second forage (Viols-en-Laval 2) a traversé une cavité importante sur environ deux mètres aux alentours de 140 m de profondeur. Lors de pluies importantes sur ce secteur, cette cavité se met en eau puis se vidange lentement, le niveau d'eau mettant plus d'un mois pour revenir à son état initial. Ce comportement hydrodynamique indique une faible connectivité de la zone d'infiltration recoupée par le forage (et par conséquent de la cavité) vis-à-vis du réseau de drainage principal de l'aquifère du Lez dans ce secteur.

Le forage du Triadou a permis de mettre en évidence des indices de karstification à proximité de la source du Lez. Il est décrit au chapitre consacré à ce thème (§ 3.6).

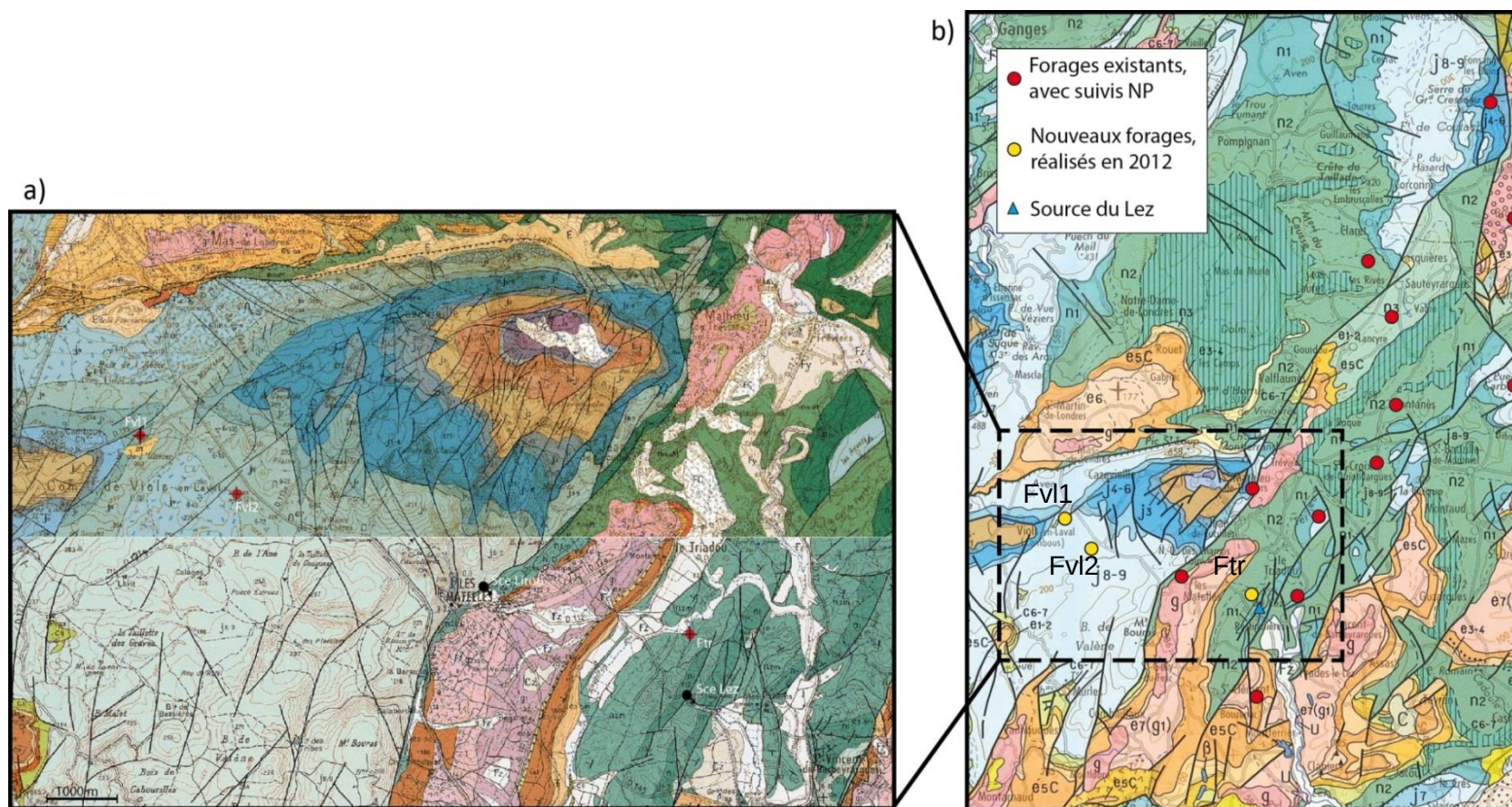


Illustration 14 : Extrait de la carte géologique 1 : 25000 de Saint Martin de Londres et de Montpellier avec (a) Localisation des nouveaux forages (Ftr : forage du Triadou ; Fvl1 et Fvl2 : forages de Viols-en-Laval 1 et 2); (b) Localisation de ces nouveaux forages par rapport aux piézomètres existants. Les formations géologiques principales pour l'aquifère du Lez sont : J8-9 (calcaires du Kimméridgien) en bleu-vert clair à l'ouest de la feuille ; n1 (marno-calcaires du Berriasien) en vert foncé à l'est et n2 en vert (marnes ou calcaires du Valanginien).

3. La source du Lez et son exploitation

3.1. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION

Les aquifères karstiques constituent des réservoirs d'eau souterraine importants pour faire face à une hausse croissante des besoins en eau, notamment du fait de l'augmentation démographique dans les régions méditerranéennes, tout particulièrement sur le littoral et au sein de ses métropoles. Dans le cas d'un aquifère karstique de type vauclusien¹, une « gestion active » (Collin 1994) permet d'exploiter de manière optimale la ressource en eau souterraine, en s'affranchissant des effets négatifs des fortes variations de débit des sources. Il s'agit de pomper, en saison sèche, à un débit supérieur au débit d'étiage, afin de solliciter les réserves que renferment ces aquifères (Avias 1995). Celles-ci se reconstituent ensuite au cours de la saison des pluies suivante. Par ailleurs, la préservation du milieu écologique des fleuves côtiers revêt également un enjeu important, notamment en période d'étiage, période durant laquelle un soutien par une partie des eaux pompées constitue une solution pour le maintien d'un débit réservé, permettant le bon équilibre écologique du cours d'eau. Une gestion multi-usages de tels aquifères est donc susceptible de répondre de manière intégrée à ces problématiques en apparence antagonistes : besoins supplémentaires en eau pour l'AEP, réduction des risques d'inondation et contribution à la préservation des milieux aquatiques.

Les conditions d'exploitation à la source du Lez ont évolué dans le temps selon trois schémas principaux décrits à l'illustration 15. Il résulte, de ces différentes conditions d'exploitation, des données piézométriques de signification et qualité très différentes selon les périodes considérées :

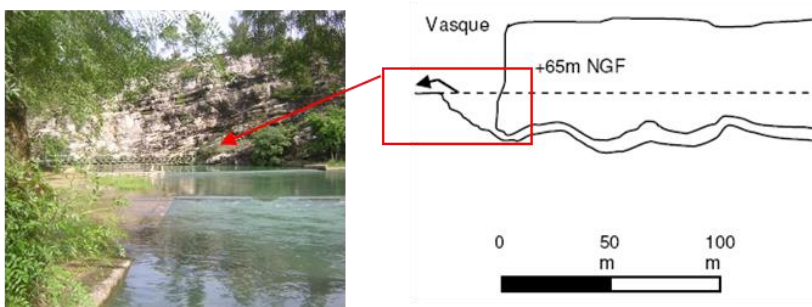
- les données de piézométrie acquises avant 1951 ne peuvent pas être exploitées, car elles n'ont pas pu être rattachées à un repère connu. Entre 1951 et 1967, la piézométrie a été mesurée au niveau de la vasque et est exprimée par rapport à la cote du seuil déversoir (cote 64,92 m NGF jusqu'en 1967). Sur cette période, le débit de débordement de la vasque peut être estimé à l'aide d'une courbe de tarage. Cette courbe de tarage repose sur des jaugeages réalisés entre 1962 et 1963 (données rassemblées par Thiery et Bérard, 1983) ;
- en juin 1967, le seuil déversoir de la source du Lez a été surélevé de 6 cm (cote du nouveau repère : 64,98 m NGF). Les cotes piézométriques mesurées avant 1967 ont été normalisées par rapport au nouveau repère (64,98 m NGF) dans un souci de simplicité. Entre juin 1967 et décembre 1982, le débit de débordement de la vasque peut être estimé à l'aide d'une autre courbe de tarage. Cette courbe de tarage repose sur des jaugeages réalisés entre 1969 et 1970 (données rassemblées par Thiery et Bérard, 1983) ;
- à partir de décembre 1982, la piézométrie est mesurée uniquement au niveau du forage 4 (Illustration 16) de la chambre de captage. Entre 1983 et 1984, la piézométrie a été mesurée de manière simultanée à la vasque et au forage. La confrontation des informations obtenues sur cette période ne permet pas d'établir une relation fiable de correspondance de charge entre la vasque et le forage. Le capteur de pression du forage n'a pas assez de précision ($\pm 0,1$ m)

¹ Karst barré à l'aval par un aquiclude, caractérisé par un écoulement captif dans le drain, ce dernier étant ascendant vers la source (telle la Fontaine de Vaucluse)

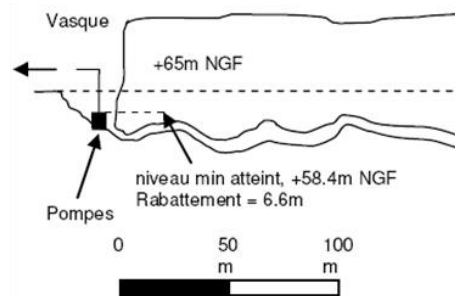
pour établir de manière précise la relation entre la charge mesurée à la vasque et le drain. La différence de charge entre la vasque et le forage est liée aux pertes de charges quadratiques provoquées par le drain karstique (fonction du débit du système karstique). Entre 1982 et 1987, les débits de débordement du karst ne peuvent donc pas être estimés de manière fiable à partir des données piézométriques acquises au forage ;

- à partir de 1987 et jusqu'en 2007, les débits de débordement de la source du Lez ont été estimés à l'aide de la station hydrométrique de la DREAL (Y3204020) située à environ 300 m en aval de la source. En période d'étiage, lorsque la source est tarie en raison des pompages, le canal de restitution (Illustration 17) permet la mesure du débit de soutien d'étiage imposé ($Q=160$ l/s) ;

Prélèvement gravitaire à la vasque d'émergence de la source du Lez (avant 1968).



Dispositif de pompage dans la vasque d'émergence de la source du Lez (de 1968 à 1982).



Réseau karstique de la source du Lez [Paloc, 1979] et dispositif de captage dans le drain (depuis 1982).

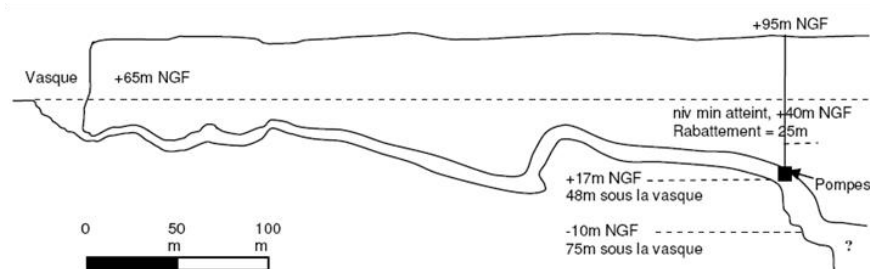


Illustration 15: modalités des conditions de captage depuis 1951



Illustration 16 : Forage n°4 de la chambre de captage de la source du Lez



Illustration 17: Déversoir du débit restitué au Lez

Recommandation : étant donné le manque de précision du capteur actuel au forage 4 (+/- 0,1 m) et la présence de pertes de charge quadratiques dans le conduit karstique entre le forage 4 et la vasque, il n'est pas possible d'établir une courbe de tarage précise pour estimer les débits de débordement à la vasque. Il conviendrait (i) d'effectuer des mesures de hauteur d'eau précises au niveau de la vasque et (ii) d'éventuellement remplacer le capteur du forage 4 par un capteur plus précis (< 10 bars).

3.2. LES DEBITS A LA SOURCE DU LEZ

Référence : Rapport BRGM/RP-60222-FR²

3.2.1. Définitions

Dans la configuration actuelle d'exploitation de la source (Illustration 19), nous allons définir quatre débits différents :

- le débit naturel (Q_n) : débit du système karstique qui se serait naturellement écoulé à la source du Lez en l'absence de pompage ;
- le débit de pompage (Q_p) : débit effectivement extrait du conduit karstique au moyen des trois pompes de l'usine de pompage ; il diffère du débit extrait de l'hydrosystème car en basses eaux, une partie de ce débit (dit « débit réservé » égal à 160 l/s actuellement) alimente le fleuve Lez ;
- le débit de sollicitation des réserves (Q_s) : lorsque le débit de pompage est supérieur au débit naturel, une partie du débit de pompage provient de la sollicitation des réserves de l'aquifère karstique ;
- le débit résiduel à la source (Q_r) : c'est le débit qui s'écoule à la source avant adjonction du débit réservé (Illustration 18).

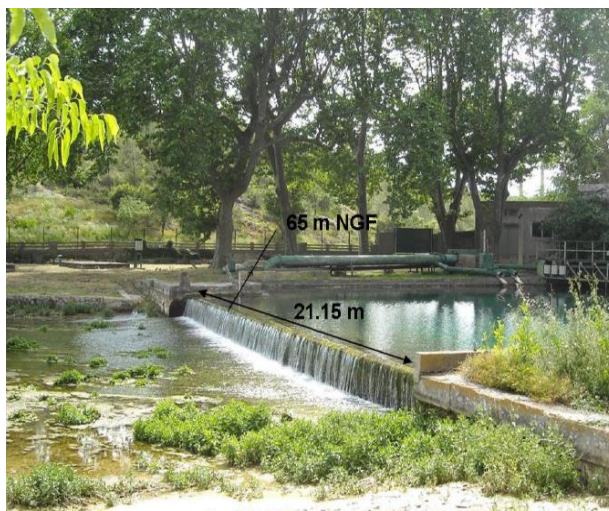


Illustration 18: Déversoir de la source du Lez (photo Ginger environnement, 2010)

² Les débits naturels (§ 3.2.3) ont été recalculés en cours de projet, entre l'édition des rapports BRGM/RP-60041-FR et BRGM/RP-60222-FR, pour prendre en compte une nouvelle courbe de tarage au seuil de la vasque : les tableaux de chiffres présentés dans ce rapport de synthèse correspondent aux chiffres corrigés, décrits dans le rapport BRGM/RP-60222-FR

Le fonctionnement à la source doit être décrit en considérant deux périodes différentes (hautes et basses eaux). En période de hautes eaux (Illustration 19a), on observe un débit résiduel de débordement à la source ($Q_r = Q_n - Q_p$). Les pompages ne mobilisent pas les réserves du karst et le débit pompé (Q_p) correspond à une partie du débit naturel (Q_n) qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage. Le débit résiduel de débordement ($Q_r = Q_n - Q_p$) est uniquement observé lorsque $Q_n > Q_p$, ce qui correspond aux périodes de hautes eaux ($h > 65$ m NGF).

En basses eaux (Illustration 19b), le débit de pompage (Q_p) est compris entre 1200 et 1700 l/s. Ce débit (Q_p) est supérieur au débit qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage (Q_n). Le pompage provoque alors le tarissement de la source ($Q_r = 0$). Le débit pompé (Q_p) lors de ces périodes s'interprète comme le résultat de la somme du débit qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage (Q_n) et du débit provenant des réserves (Q_s) sollicité par le pompage.

Le débit d'eau issue des réserves ($-Q_s$) s'interprète comme le résultat du déstockage des drains karstiques et la mobilisation de l'eau de la matrice carbonatée dans laquelle s'est développé le réseau de drainage karstique (Maréchal et al, 2008). Les pompages mobilisent donc les réserves en eau du système karstique peu ou pas accessibles en conditions naturelles de fonctionnement. Ce phénomène se traduit par une diminution de la charge piézométrique dans le drain karstique et un tarissement de la source ($Q_r = 0$).

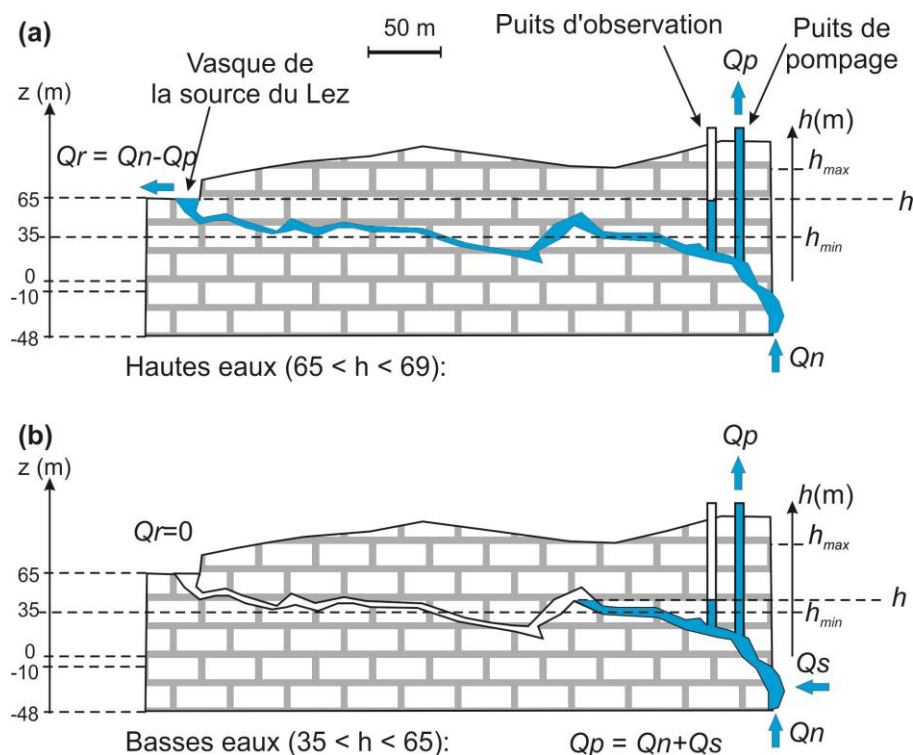


Illustration 19 : Schéma de fonctionnement hydrodynamique de la source du Lez en hautes eaux (a) et basses eaux (b)

3.2.2. Modélisation

Les débits naturels de la source du Lez n'ont jamais pu être mesurés car la source est exploitée depuis plusieurs décennies. Dès lors, ils ont été reconstitués au moyen d'une modélisation inverse avec le code Tempo. Le schéma de principe de l'approche de modélisation est présenté sur l'illustration 20. Les calculs sont réalisés au pas de

temps journalier. La première étape de la simulation consiste à calculer les débits naturels de la source du Lez (non influencés par les pompages), à partir des données climatiques (pluie et évapotranspiration potentielle ou température de l'air). Ceci est réalisé par le premier module de transfert « débit naturel du Lez » du modèle hydrologique (Illustration 20b). Le débit de débordement à la source du lez ($Q_r = Q_n - Q_p$) peut être également déduit de cette méthode.

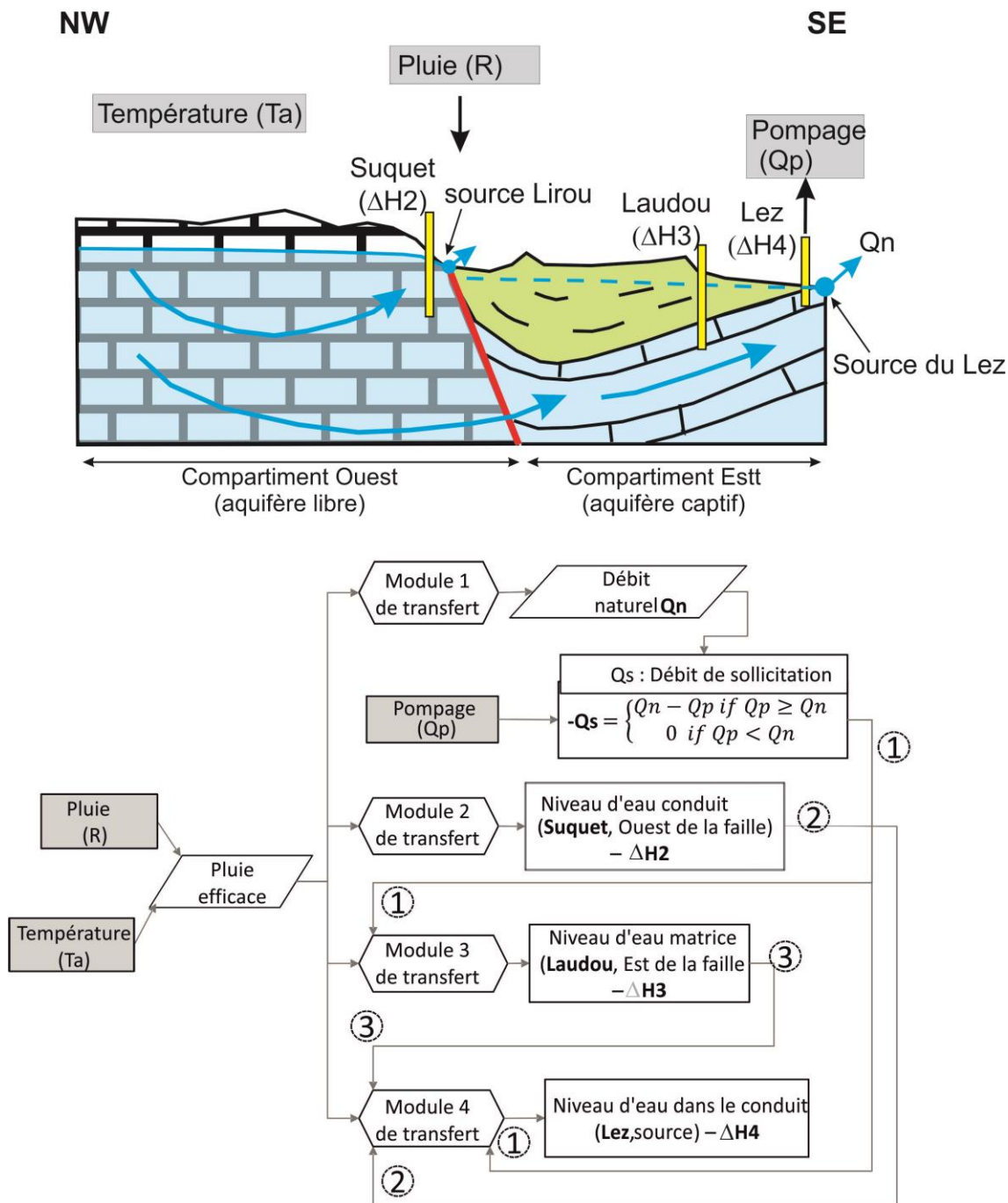


Illustration 20 : (a) coupe hydrogéologique de l'aquifère du Lez (b) schéma de modélisation inverse Tempo

Une fois le débit naturel calculé, un modèle de transfert (numéroté 4 à l'illustration 20b) est utilisé : « niveau d'eau dans le conduit, Lez ». Ce modèle comporte quatre entrées :

- la pluie efficace. Dans le modèle piézométrique du Lez, la contribution de la pluie efficace a été fixée à 1% (contribution négligeable) car l'information recharge par les pluies efficaces est déjà portée par les chroniques piézométriques utilisées en entrée pour décrire le fonctionnement du drain karstique ;
- la fonction de sollicitation des réserves du karst calculée à l'aide des débits naturels modélisés et des pompages (qui engendre une diminution du niveau piézométrique lorsque le débit de pompage devient supérieur au débit naturel de la source). Cette fonction de sollicitation des réserves³ du karst ($-Q_s$) peut être calculé au moyen de l'équation suivante :

$$\begin{cases} \text{si } Q_p \geq Q_n & \text{alors } -Q_s = Q_n - Q_p \text{ et } Q_r = 0 \\ \text{si } Q_p < Q_n & \text{alors } -Q_s = 0 \text{ et } Q_r = Q_n - Q_p \end{cases}$$

$-Q_s$ (<0) représente le débit de sollicitation des réserves, Q_p le débit de pompage, Q_n le débit naturel qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage.

- la contribution en provenance du compartiment jurassique situé à l'Ouest de la faille de Corconne. Cette contribution est estimée à l'aide de la variable piézométrique Suquet qui est générée par la méthode de transfert 2 « piézométrie Suquet »;
- la contribution en provenance du compartiment crétacé à l'aide de la variable piézométrique Laudou qui est générée par la méthode de transfert 3 « Niveau d'eau matrice, Laudou ». Cette entrée prend en compte les effets liés au pompage par l'intermédiaire de la prise en compte de la fonction de sollicitation Q_s .

Ce modèle est décrit dans le détail dans le rapport BRGM/RP-60222-FR (Borrell et al. 2012) ainsi que dans une publication scientifique (Ladouche et al. 2014).

3.2.3. Débit naturel

L'évolution des débits naturels estimés sur la période 1976-2010 est présentée à l'illustration 21. Les débits moyens annuels sur la période sont présentés à l'illustration 22. Des éléments de statistiques descriptives pour les valeurs mensuelles sont également présentés dans l'illustration 23 ; le débit moyen étant de 1850 l/s.

³ Dans la suite, nous considérerons le terme $-Q_s$, négatif en période de sollicitation, par convention pour les opérations de traitement du signal

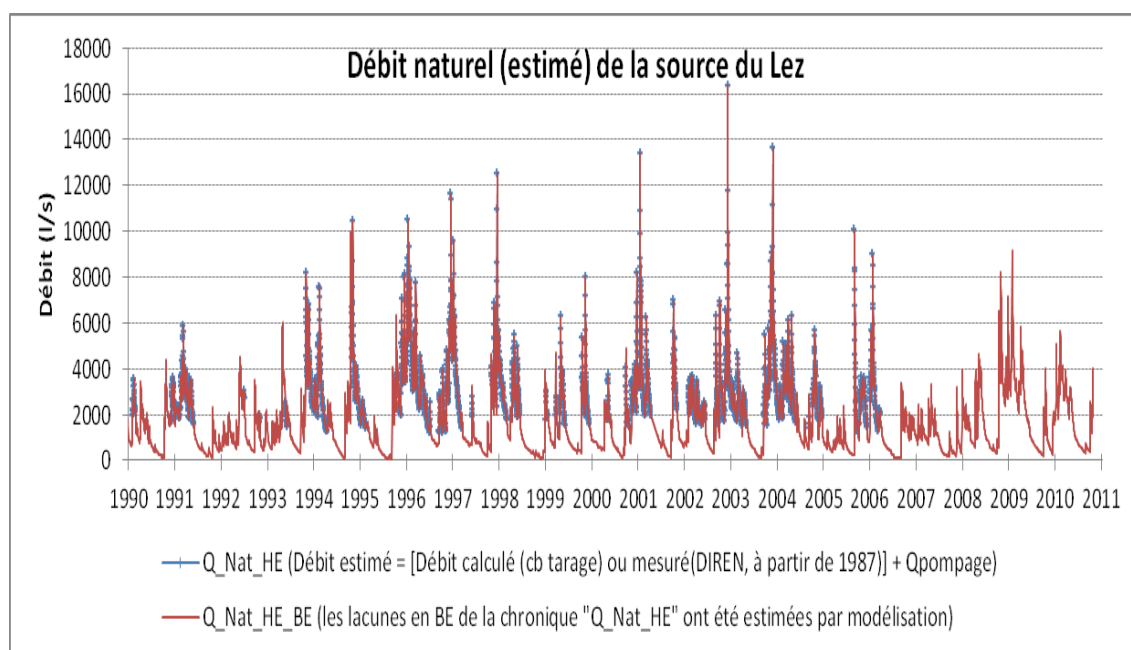
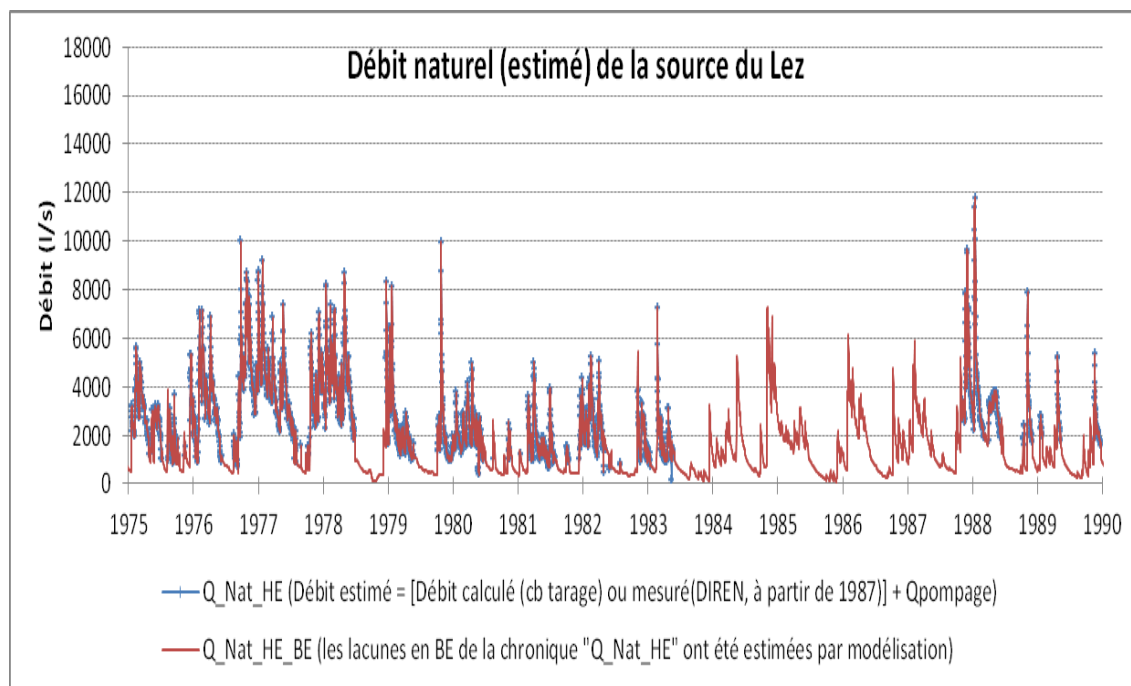


Illustration 21: Evolution des débits naturels estimés depuis 1975. (a) période 1975 – 1990 (b) période 1990-2010

Année	Qmoy (l/s)		Année	Qmoy (l/s)		Année	Qmoy (l/s)
1976	3225		1987	2176		1999	1653
1977	3302		1988	2134		2000	1356
1978	2540		1989	1228		2001	2065
1979	1688		1990	1364		2002	2317
1980	1440		1991	1520		2003	2272
1981	1197		1992	1335		2004	2285
1982	1518		1993	1909		2005	1309
1983	960		1994	2334		2006	1424
1984	1836		1995	1704		2007	957
1985	1257		1996	3154		2008	2020
1986	1670		1997	1942		2009	2066
1987	2176		1998	1534			

Illustration 22 : Valeurs moyennes annuelles du débit naturel estimées à la source du Lez

Qnat_HE_BE (ct Ginger_intermédiaire)= Débit naturel estimé						
(les lacunes en BE de la chronique "Q_Nat_HE" ont été estimées par modélisation)						
Mois	1	2	3	4	5	6
Nb valeurs journalières	1085	989	1085	1050	1085	1050
minimum	335	425	348	450	393	279
Décile 0.1	712	746	838	804	883	643
Decile 0.2	856	1084	1080	1073	1229	782
1er Quartile	948	1365	1247	1314	1332	838
Médiane	2170	2298	1969	2062	1884	1143
3ème Quartile	3284	3597	3052	2922	2920	1817
Décile 0.8	3774	3911	3300	3099	3189	1999
Decile 0.9	5349	4892	3927	3655	3784	2594
maximum	13408	9181	7755	6884	8673	4540
Moyenne	2600	2613	2226	2212	2212	1417
ecart-type	2013	1617	1254	1161	1215	807
Mois	7	8	9	10	11	12
Nb valeurs journalières	1085	1085	1050	1085	1020	1054
minimum	103	81	83	98	83	83
Décile 0.1	403	215	214	272	338	469
Decile 0.2	507	300	283	385	587	821
1er Quartile	533	330	327	439	860	985
Médiane	704	485	462	1408	2071	2066
3ème Quartile	883	609	730	2508	3388	3609
Décile 0.8	934	636	1243	3014	3704	3916
Decile 0.9	1101	746	2215	4092	5070	5041
maximum	3934	2662	10043	9963	10459	16358
Moyenne	771	514	882	1807	2419	2554
ecart-type	441	303	1170	1709	1885	2054

Illustration 23 : Statistiques descriptives des débits naturels de la source du Lez (valeurs en l/s, période de 34 ans entre 1976 et 2009)

3.2.4. Débit de pompage

La synthèse des données de pompage et des modalités de prélèvement à la source du Lez est présentée dans le rapport BRGM/RP-60041-FR (Jourde et al., 2011). Des données journalières d'évolution du débit de pompage sont disponibles pour les périodes 1975-1990 et 1995-2010. La période 1990-1994 est caractérisée par des valeurs hebdomadaires ou mensuelles qui ont été (linéairement) interpolées au pas journalier pour les besoins de l'étude (Illustration 24). Des éléments de statistiques descriptives des prélèvements sont présentés dans l'illustration 25, le débit moyen étant de 1000 l/s.

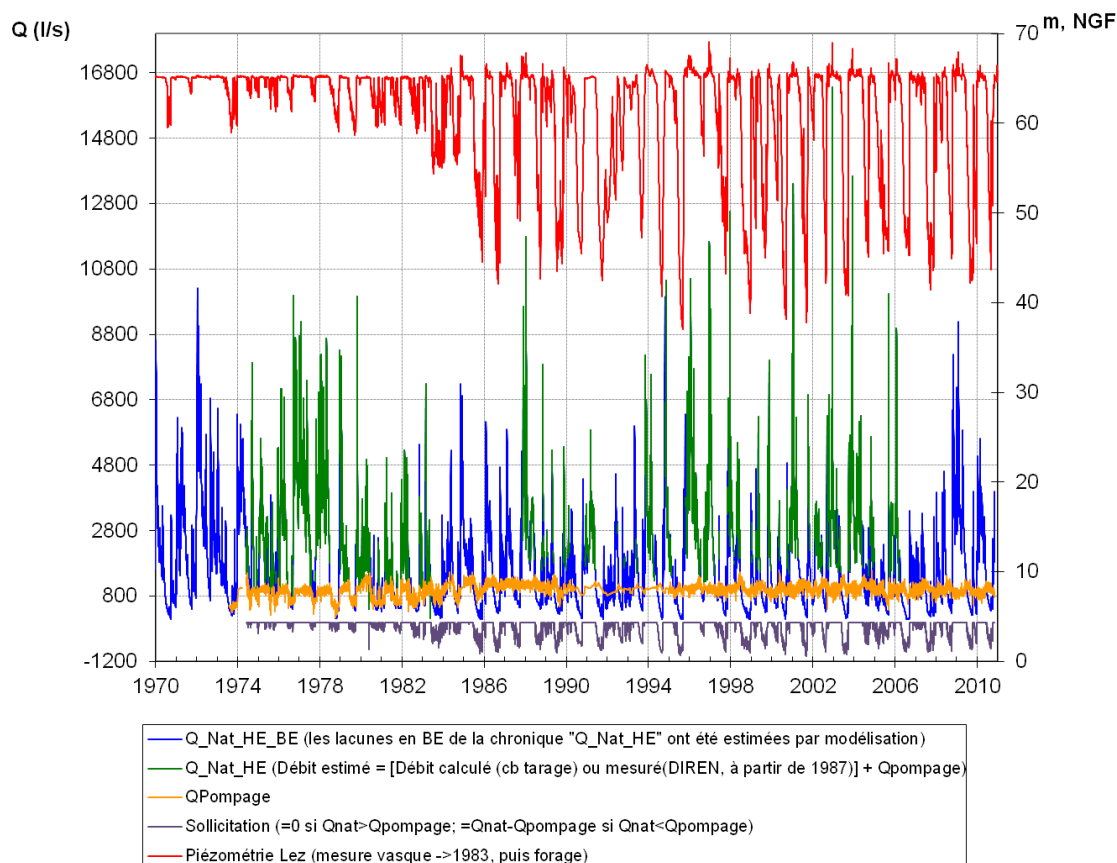


Illustration 24 : Evolution de la piézométrie à la source du Lez depuis 1970 et des débits naturels estimés depuis 1975. Les débits de pompage ainsi que les débits de sollicitation des réserves sont également reportés (depuis 1974).

Prélèvement						
Mois	1	2	3	4	5	6
Nb valeurs journalières	1085	989	1085	1050	1085	1050
minimum	466	555	571	318	530	414
Décile 0.1	835	852	886	887	919	887
Decile 0.2	896	902	927	932	960	963
1er Quartile	915	920	949	952	984	998
Médiane	998	1013	1027	1033	1065	1105
3ème Quartile	1060	1078	1105	1117	1168	1222
Décile 0.8	1078	1109	1137	1149	1195	1245
Decile 0.9	1168	1178	1201	1217	1254	1307
maximum	1419	1387	1385	1529	1498	1525
Moyenne	992	1006	1035	1041	1077	1100
ecart-type	133	132	121	133	131	167

Mois	7	8	9	10	11	12
Nb valeurs journalières	1085	1085	1050	1085	1020	1054
minimum	388	435	245	140	316	459
Décile 0.1	766	645	596	649	722	763
Decile 0.2	910	731	709	812	869	864
1er Quartile	966	781	771	849	894	886
Médiane	1097	1005	964	945	972	988
3ème Quartile	1184	1094	1041	1035	1040	1060
Décile 0.8	1205	1118	1054	1054	1058	1077
Decile 0.9	1260	1169	1109	1117	1114	1117
maximum	1453	1369	1343	1337	1577	1335
Moyenne	1055	947	907	914	949	959
ecart-type	193	198	191	192	159	147

Illustration 25 : Statistiques descriptives des débits prélevés à la source du Lez [1976-1982] et dans les forages [1983-2010], (valeurs en l/s, période de 34 ans entre 1976 et 2010)

3.2.5. Débit de sollicitation des réserves du karst

Des données journalières d'évolution du débit de sollicitation des réserves du karst sont disponibles pour les périodes 1975-1990 et 1995-2010. La période 1990-1994 est caractérisée par des valeurs hebdomadaires ou mensuelles (Illustration 24). Des éléments de statistiques descriptives des prélèvements sont présentés dans l'illustration 26 (moyenne annuelle de 160 l/s). La sollicitation des réserves du karst est maximale en été, en moyenne de l'ordre de 466 l/s pour le mois d'août, par exemple. Pour les années déficitaires en recharge (décile 0,1), les débits de sollicitation des réserves du karst sont de l'ordre de 800 l/s au mois d'août.

Moyenne de Sollicitation (=0 si $Q_{nat} > Q_{pompage}$; = $Q_{nat} - Q_{pompage}$ si $Q_{nat} < Q_{pompage}$)						
	1	2	3	4	5	6
Nb valeurs journalières	1085	989	1085	1050	1085	1050
minimum	-581	-608	-818	-689	-829	-943
Décile 0.1	-246	-174	-170	-165	-147	-520
Decile 0.2	-82	0	0	0	0	-283
1er Quartile	0	0	0	0	0	-202
Médiane	0	0	0	0	0	0
3ème Quartile	0	0	0	0	0	0
Décile 0.8	0	0	0	0	0	0
Decile 0.9	0	0	0	0	0	0
maximum	0	0	0	0	0	0
Moyenne	-55	-38	-44	-38	-36	-138
ecart-type	117	97	126	102	109	221
	7	8	9	10	11	12
Nb valeurs journalières	1085	1085	1050	1085	1020	1054
minimum	-1001	-1018	-1037	-952	-905	-934
Décile 0.1	-737	-808	-784	-639	-447	-298
Decile 0.2	-613	-714	-669	-406	-180	-112
1er Quartile	-565	-671	-640	-282	-103	-15
Médiane	-350	-513	-416	0	0	0
3ème Quartile	-107	-234	-47	0	0	0
Décile 0.8	-54	-162	0	0	0	0
Decile 0.9	0	-57	0	0	0	0
maximum	0	0	0	0	0	0
Moyenne	-356	-466	-383	-168	-103	-73
ecart-type	269	271	305	255	208	164

Illustration 26 : Statistiques descriptives des débits de sollicitations ($-Q_s$) des réserves du karst (valeurs en l/s, période 1976-2009)

3.3. GESTION ACTIVE

La mise en place de la gestion active par pompages profonds au sein du conduit karstique du Lez en 1982 se traduit par une augmentation globale des débits de prélèvements. Au cours d'un cycle annuel (Illustration 27a), l'augmentation des débits mensuels de pompage se produit principalement en été et en automne. Entre janvier et mai, les prélèvements restent sensiblement les mêmes.

Durant l'été (juillet-septembre), l'augmentation des prélèvements est compensée par la sollicitation des réserves de l'aquifère (Illustration 27b). En automne (octobre-décembre), c'est le débit naturel du système karstique qui compense l'augmentation des prélèvements, la sollicitation des réserves étant alors nulle.

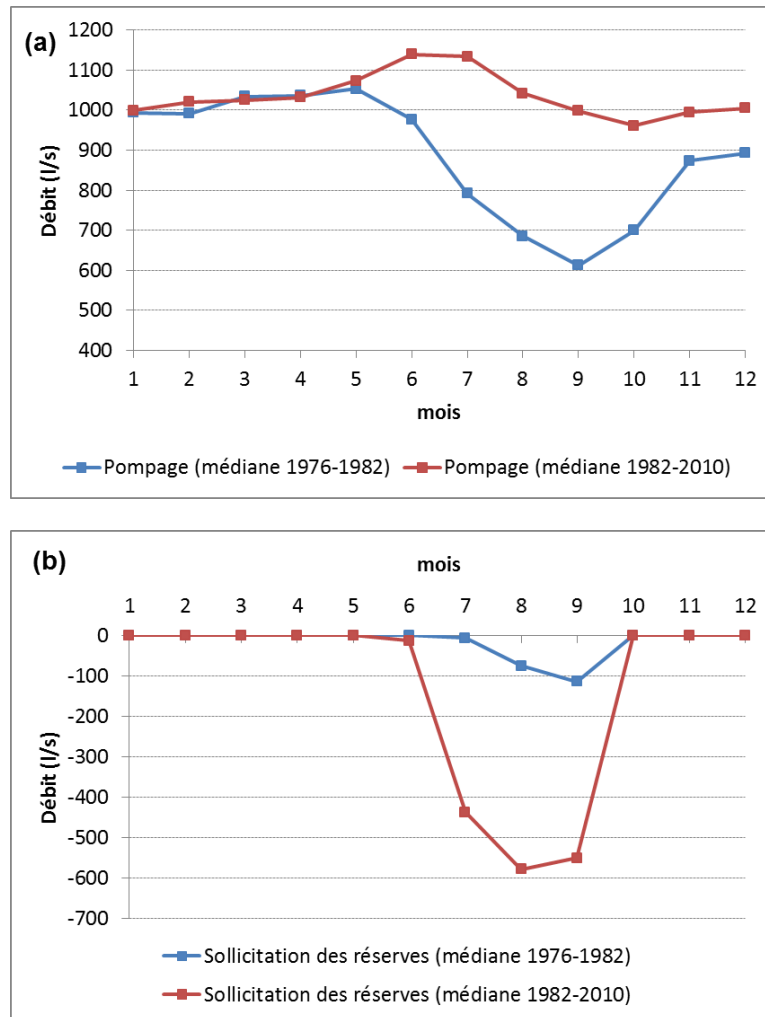


Illustration 27 : comparaison des débits moyens mensuels de pompage (Q_p) (a) et de sollicitation des réserves ($-Q_s$) de l'aquifère (b) avant et après la mise en fonction de l'usine de pompage en 1982

3.4. PIEZOMETRIE ET CYCLES DE POMPAGES

Référence : rapport BRGM/RP-60041-FR

3.4.1. Introduction

A chaque cycle hydrologique, durant la période estivale, le niveau piézométrique dans le drain karstique du système du Lez décroît de plusieurs dizaines de mètres suite aux pompages effectués. La source cesse alors de déborder. Ensuite, lors des pluies automnales, les niveaux remontent et la source déborde à nouveau. Il en résulte des cycles annuels de baisse des niveaux d'eau comparables à ceux observés lors d'essais de pompage effectués sur un puits de pompage. Ces cycles, à l'échelle saisonnière, ont été étudiés de façon similaire à des essais de pompage afin d'en déduire les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère du Lez et la nature des écoulements souterrains.

Ainsi, les courbes de niveaux d'eau à la vasque peuvent être interprétées comme des courbes de rabattements. Le débit de pompage considéré alors pour l'interprétation est le débit de sollicitation du système, c'est-à-dire le débit de pompage moins le débit

naturel du système (débit tel qu'il serait en l'absence de prélèvements – voir rapport BRGM/RP-60041-FR). Les résultats de ces interprétations sont présentés ci-dessous.

3.4.2. Interprétation des pompages à l'échelle saisonnière

Les cycles de pompage ont été interprétés individuellement au niveau de la vasque du Lez. A titre d'exemple, l'interprétation de la courbe de rabattement de l'année 2002 est présentée sur l'illustration 28. On y constate une très bonne capacité du modèle classique (à écoulement radial) de Theis à reproduire les rabattements observés. La transmissivité $T = 0.006 \text{ m}^2/\text{s}$ est très élevée, signe de la grande perméabilité de cet aquifère fortement karstifié. L'emmagasinement $S = 13000$ n'a aucune signification physique parce que calculé au puits de pompage et non dans un piézomètre d'observation.

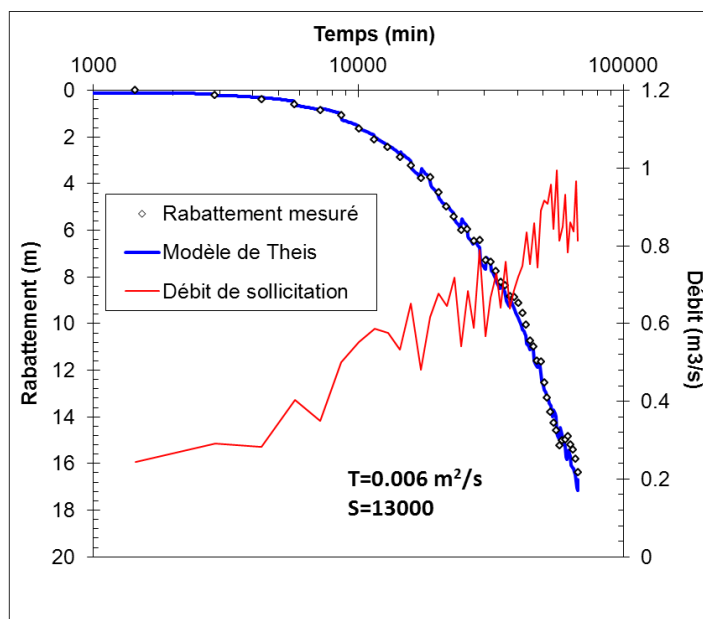


Illustration 28 : Exemple d'interprétation du cycle de pompage de 2002

Plusieurs cycles hydrologiques récents (1986, 1987, 1998, 2002, 2003, 2005 et 2006) ont été interprétés au moyen du modèle de Theis (Illustration 29). Il est remarquable de constater à quel point la transmissivité obtenue varie peu d'un cycle à l'autre (entre 6.0 et $6.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). Cet élément confirme l'aptitude du modèle de Theis à reproduire le comportement du système karstique du Lez sollicité par un pompage. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement, comme pour tout essai hydraulique mesuré au puits de pompage, n'ont aucune signification physique et constituent uniquement une variable d'ajustement. La valeur de transmissivité obtenue correspond à une valeur globale de l'aquifère sollicité, incluant les contributions du réseau de drains karstiques et de la matrice calcaire. Seule une modélisation plus détaillée, prenant en compte individuellement les conduits karstiques et la matrice, permettrait de distinguer les contributions relatives des conduits karstiques et de la matrice calcaire.

Année	Transmissivité T (m ² /s)	Emmagasinement S (-)	Rabatement maximum (m)
1986	6,2E-03	1,4E+04	10,3
1987	6,3E-03	1,6E+04	13,5
1998	6,9E-03	5,7E+03	10,0
2002	6,0E-03	1,3E+04	14,3
2003	6,9E-03	6,8E+03	19,2
2005	6,7E-03	1,6E+04	9,6
2006	6,6E-03	1,3E+04	14,7

Illustration 29 : Tableau de synthèse des paramètres hydrodynamiques estimés au moyen du modèle de Theis appliqué à la source du Lez

Les niveaux piézométriques observés dans le bassin d'alimentation montrent une très forte corrélation entre les rabattements observés dans le drain karstique induits par le pompage et les rabattements observés à plus grande distance (Illustration 30).

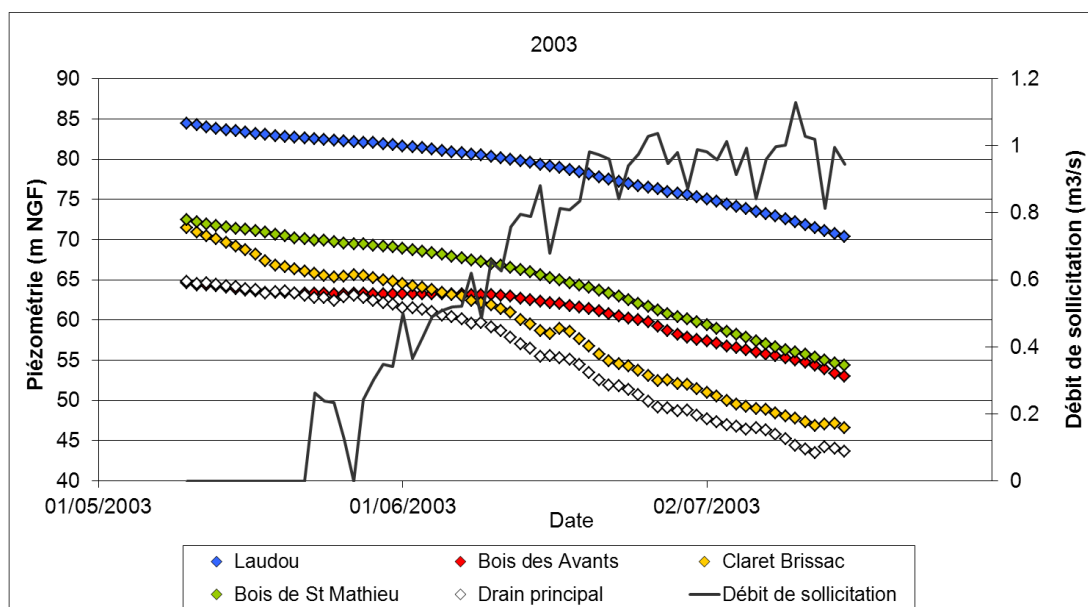


Illustration 30: Niveaux piézométriques dans les piézomètres d'observation du Lez pendant l'année 2003

Une interprétation des rabattements aux piézomètres a été effectuée et donne les résultats détaillés à l'illustration 31. Les transmissivités obtenues sont proches de celle estimée à la source tandis que les coefficients d'emmagasinement ($S = 10^{-3}$ à 10^{-5}) sont dans des ordres de grandeur de nappe captive sans doute liés à la présence de drains karstiques en charge. La très forte diffusivité observée est cohérente avec la réaction quasi-synchrone du piézomètre de Claret aux fluctuations de débits de pompage à la source du Lez située à 18 kilomètres. A noter que cette valeur de diffusivité est en accord avec les valeurs obtenues pour les 22 puits d'observation du site expérimental du Terrieu (proximité de Saint Mathieu de Trévières) en considérant les cycles de pompage à l'échelle pluri journalière et les « pulses » de pompage associés aux modifications du débit de pompage à la source du Lez (Jazayeri et al, 2011 ; rapport BRGM/RP-60041-FR) ; cela indique que le site expérimental du Terrieu présente la même connectivité que les puits d'observation précédemment mentionnés (Bois des Avants, Bois de Saint Mathieu, Claret et Laudou) avec le réseau de drainage principal.

	Distance (km)	Transmissivité T (m ² /s)	Emmagasinement S (-)	Diffusivité T/S (m ² /s)
Bois des Avants	4	6,0E-03	2,0E-03	3,0E+00
Bois de St-Mathieu	6	7,5E-03	1,5E-03	5,0E+00
Claret	18	9,5E-03	3,4E-05	2,8E+02
Laudou	15	5,7E-03	1,1E-04	5,1E+01

Illustration 31 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques estimés dans les piézomètres d'observation

Recommandation :

Il est recommandé de suivre le niveau piézométrique dans les trois piézomètres réalisés dans le cadre de cette étude (voir § 2.4), plus spécialement dans le piézomètre du Triadou en lien avec le réseau karstique de la source du Lez, dans lequel un suivi multi niveaux serait tout particulièrement pertinent en l'intégrant au réseau de surveillance actuel.

L'analyse des chroniques piézométriques a montré l'intérêt de conserver ou d'améliorer le suivi de plusieurs piézomètres référents : (i) le piézomètre de Claret à proximité de la Faille des Matelles-Corconne en lien avec le réseau karstique majeur ; (ii) le piézomètre de Laudou dont l'évolution permet de qualifier le comportement de la matrice carbonatée sous couverture et (iii) le piézomètre du Suquet en lien avec le réseau karstique à l'Ouest de la Faille des Matelles-Corconne.

Une instrumentation plus complète de la source du Lirou et/ou du forage du Suquet (forage de secours suivi par le CG34, appartenant au SMEA), intégrant un suivi de conductivité électrique et température voire fluorimétrie, permettrait de compléter la caractérisation du fonctionnement hydrogéologique du compartiment situé à l'Ouest de la Faille de Matelles-Corconne. Ceci permettrait d'affiner la comparaison avec le fonctionnement hydrogéologique du compartiment principal situé à l'Est de la Faille de Matelles-Corconne, qui a pu être caractérisé grâce aux différents suivis existants au niveau de l'exutoire principal de l'aquifère (source du Lez).

Par ailleurs, étant donné leur fort éloignement ou leur localisation au sein du compartiment ouest de l'aquifère, il ne nous paraît pas nécessaire de poursuivre la surveillance des piézomètres actuellement suivis au pas de temps mensuel (Cantagrils, Ferrières CGE, Pompignan, Sauteyrargues, Corconne Soulas, Triadou CERH).

3.5. BON ETAT QUANTITATIF DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE

Référence : Rapport BRGM/RP-60041-FR⁴

3.5.1. Définition

Le bon état quantitatif d'une eau souterraine tel que défini par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, est atteint lorsque les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement de la ressource disponible, compte tenu de la nécessaire alimentation des écosystèmes aquatiques. L'état quantitatif dépend de l'équilibre entre d'une part les prélèvements anthropiques et les besoins liés à l'alimentation des eaux de surface, et d'autre part, la recharge naturelle par les précipitations efficaces des eaux souterraines.

Une masse d'eau souterraine est considérée en bon état quantitatif s'il n'y a pas d'évolution interannuelle défavorable de la piézométrie (baisse significative et durable du niveau de la nappe, hors variations saisonnières climatiques), et si le niveau piézométrique en période d'étiage permet de satisfaire les besoins des usages, sans risque d'effets négatifs sur les milieux aquatiques terrestres liés à la nappe, ni d'intrusion saline en bordure littorale. L'état quantitatif comprend deux classes : bon et médiocre.

3.5.2. Analyse de l'état quantitatif

La masse d'eau souterraine concernée est la masse d'eau référencée à l'aide du code FRDG113, dénommée comme « Calcaires et marnes jurassiques des garrigues nord-montpelliéraines - système du Lez ». Dans le cadre de l'état des lieux mené en 2009 à l'échelle du SDAGE du bassin Rhône Méditerranée et Corse, cette masse d'eau fait l'objet d'une remarque concernant la nécessité d'actions de résorption du déséquilibre relatives aux prélèvements pour l'atteinte du bon état quantitatif. La raison de cette remarque est liée à l'exploitation par pompage (gestion active) de la source du Lez pour l'alimentation en eau potable et à la relation entre la masse d'eau souterraine et la masse d'eau de surface du Lez qui prend naissance au niveau de la source. Le débit du Lez au niveau de sa source est influencé par l'exploitation de l'aquifère, le débit étant modifié notamment en période d'étiage. Un débit de restitution est fixé par la DUP de 1981 à 160 l/s lorsque qu'il n'y a plus débordement naturel de la source (niveau de rabattement inférieur à 65 m NGF).

Les données utilisées pour caractériser le bon état quantitatif de cette masse d'eau sont décrites au § 5.4.2 du rapport BRGM RP-60041-FR (Jourde et al, 2011).

Condition 1 : prélèvements versus capacité de renouvellement

Les prélèvements dans la masse d'eau souterraine sont reportés sur le graphique ci-dessous (lignes rouge et bleue, Illustration 32). Ils comprennent d'une part les prélèvements au captage de la source du Lez depuis 1974 et d'autre part les prélèvements totaux recensés à l'échelle de la masse d'eau en considérant les prélèvements moyens annuels, totalisant 7 056 950 m³ répartis sur 30 points de prélèvements. A noter qu'en l'absence d'information relative à la variabilité temporelle de ces prélèvements depuis 1974, les données de prélèvements actuels ont été

⁴ En tenant compte de la mise à jour des débits naturels effectuée dans le rapport BRGM/RP-60222

extrapolées sur l'ensemble de la période. Cette hypothèse est certainement une hypothèse pessimiste pour les périodes anciennes. La ligne bleue représente ainsi les volumes totaux prélevés sur la masse d'eau concernée. Ces volumes prélevés sont comparés au volume des précipitations efficaces rechargeant l'aquifère qui ont été estimés à l'aide des modèles de transferts développés dans cette étude (cf. § 3.2.2) pour reconstituer les débits naturels de la source du Lez. La recharge moyenne estimée correspond à un volume de 125 000 000 m³ environ, en considérant une surface d'impluvium de recharge de 112 km². Cette recharge varie selon les cycles hydrologiques et climatiques entre 65 000 000 m³ pour les années déficitaires et 185 000 000 m³ pour les années excédentaires. Le volume de recharge efficace est très nettement supérieur au volume d'eau prélevé sur la masse d'eau concernée.

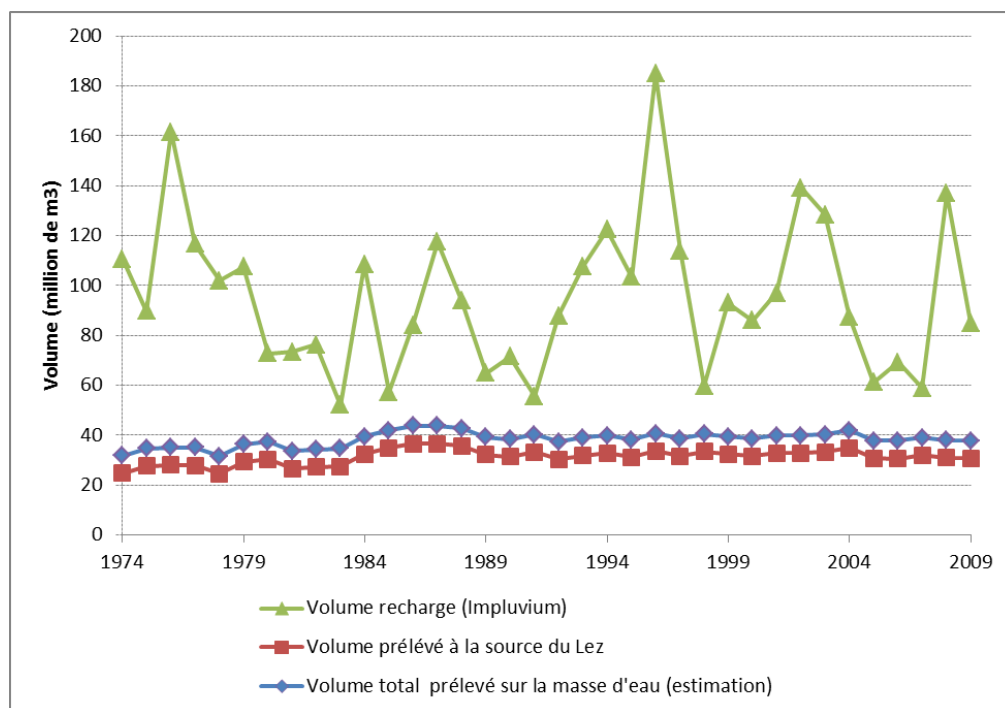


Illustration 32 : Graphique représentant les volumes des précipitations efficaces rechargeant la masse d'eau FRDG113 et les volumes prélevés au niveau de la source du Lez (en rouge) et totaux au niveau de la masse d'eau (en bleu), modifiée d'après Jourde et al. (2011)

Comme le stipule la définition du bon état quantitatif d'une masse d'eau souterraine, le bon état est atteint lorsque les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement de la ressource disponible. Cette première condition est vérifiée pour la masse d'eau souterraine concernée.

Condition 2 : évolution interannuelle stable de la piézométrie

S'il n'y a pas de baisse significative et durable du niveau de la nappe, hors variations saisonnières climatiques, la deuxième condition est validée. La piézométrie du drain karstique mesurée au niveau du forage d'observation du captage de la source du Lez (Illustration 33) présente une évolution annuelle en lien avec les pompages. Les niveaux bas sont observés à la fin des périodes d'étiage. Le drain principal du système karstique retrouve rapidement son état initial (autour de la cote 65 m NGF) après les premières pluies automnales.

Par ailleurs, la piézométrie mesurée au sein de la masse d'eau souterraine présente également des évolutions annuelles (Illustration 34) du type de celle enregistrée à la

source du Lez (captage). Les niveaux moyens mesurés sont variables en fonction de leur position au sein de la masse d'eau, avec des valeurs comprises entre 75 mNGF et 55 mNGF. Aucune tendance à la diminution en dehors des variations saisonnières n'est observée sur ces piézomètres. **La deuxième condition est donc remplie.**

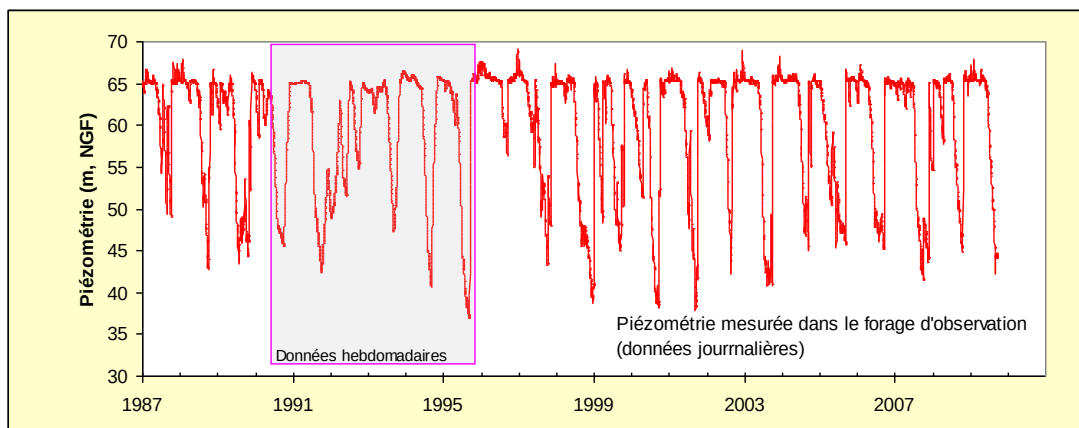


Illustration 33 : Graphique de la piézométrie mesurée dans le forage d'observation (données journalières) sur plus de vingt années, suite à la mise en exploitation par gestion active de la source du Lez, au niveau du captage

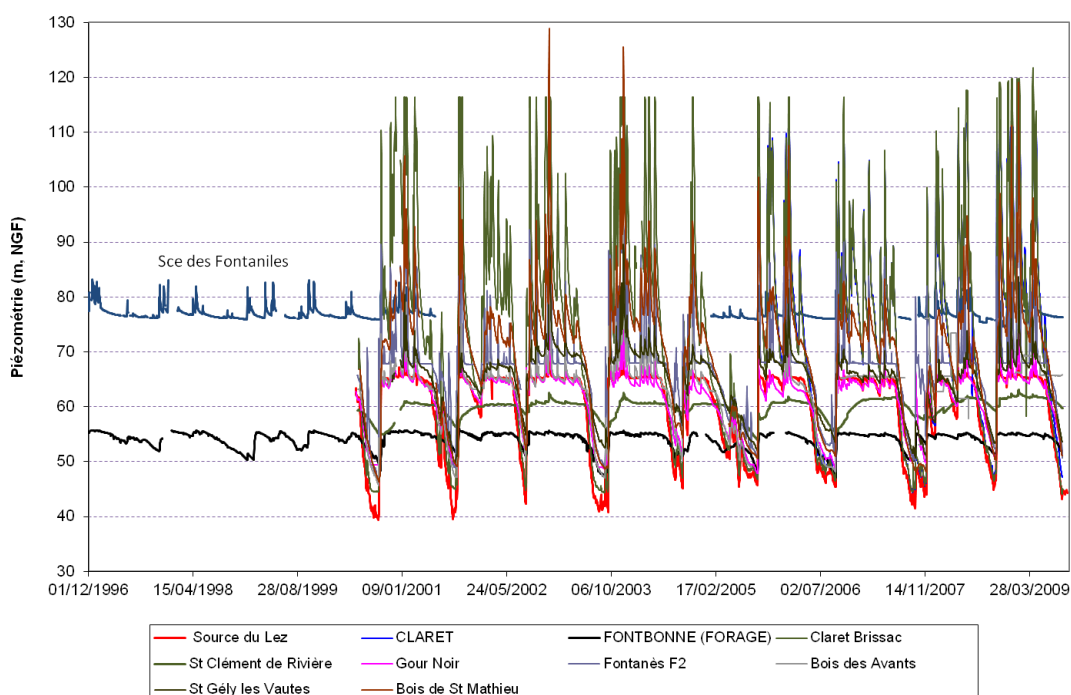


Illustration 34 : Graphique de la piézométrie mesurée au niveau d'une sélection de piézomètres situés au sein de la masse d'eau souterraine FRDG113

Condition 3 : absence d'effet négatif sur les milieux aquatiques terrestres

La **troisième condition** concerne la satisfaction des besoins des usages en période d'étiage, d'une part pour les prélèvements en eau souterraine et d'autre part, pour éviter un éventuel effet négatif sur les milieux aquatiques terrestres dépendant de la masse d'eau. L'étude des débits du Lez et des volumes prélevables sur la masse

d'eau de surface menée pour le SyBLE permettra d'apporter des éléments circonstanciés au sujet de cette troisième condition, notamment sur la qualification des effets négatifs sur les milieux aquatiques terrestres associés au fleuve Lez.

Condition 4 : absence d'intrusion saline

Finalement la dernière condition concerne les masses d'eau situées en bordure littorale pour lesquelles l'exploitation ne doit pas conduire à une intrusion saline. La masse d'eau concernée n'est pas située sur le littoral. Par ailleurs, les concentrations moyennes en Cl⁻ demeurent très faibles, de l'ordre de 40 mg/l avec des pics pouvant atteindre 80 à 100 mg/l (Bicalho 2010). Les pics apparaissent essentiellement lors des crues automnales, après l'étiage, lors de la recharge et de la reprise de l'écoulement à la source. Ces pics de concentration sont associées à une composante d'origine profonde (cf. rapport BRGM/RP-60013-FR) mise en charge de manière significative (jusqu'à 20%) ponctuellement lors des crues automnales. A noter que ces concentrations sont de plusieurs ordres de grandeur inférieurs à des concentrations liées à des intrusions salines dans des aquifères karstiques littoraux où les concentrations en chlorures sont de l'ordre du g/l, voire plus. Cette **dernière condition est donc bien remplie**.

Conclusion et recommandation :

Les procédures mises en place dans cette étude ont permis d'estimer les débits naturels de la source du Lez sur la période 1962-2009. Sur la base de ces résultats, nous pouvons montrer que les volumes prélevés annuellement sont inférieurs à la recharge annuelle. Les réserves sollicitées par les pompages en période de basses eaux sont reconstituées dès les premières pluies automnales aussi bien à l'exutoire principal que sur les piézomètres d'observation. Enfin, il n'y a pas d'intrusion saline liée à l'exploitation par pompage. Dans ce contexte, au moins trois des quatre conditions pour le bon état quantitatif de la masse d'eau souterraine au sens de la DCE sont remplies. Une étude complémentaire sur les volumes prélevables doit être menée pour indiquer si la dernière condition, à savoir, l'absence d'impact négatif sur les eaux de surface associées, est remplie.

3.6. INDICES SUR LA KARSTIFICATION A PROXIMITE DE LA SOURCE

Référence : Rapport BRGM/RP-61612-FR

Le forage du Triadou a été réalisé à environ 800 m à vol d'oiseau de la source du Lez, dans la partie captive de l'aquifère (Illustration 2). Le réservoir de l'aquifère a été atteint après avoir traversé 180 m de marnes valanginiennes (Crétacé inférieur) qui constituent le toit imperméable de l'aquifère, lui conférant un caractère captif à cet endroit. Cette captivité se vérifie d'ailleurs par la stabilisation du niveau piézométrique à 30 m sous la surface alors que le toit de l'aquifère se situe à 180 m de profondeur.

Des mesures au micro-moulinet ont permis de mettre en évidence deux arrivées d'eau principales : (i) la première venue d'eau provient d'un drain identifié à 225 m de profondeur (soit à -133 m NGF) dans le Berriasien ; (ii) la seconde venue d'eau provient d'une zone fortement karstifiée entre 265 m et 270 m de profondeur (soit à -178 m NGF), ce qui correspond à la transition entre le Berriasien et le Jurassique supérieur (voir Illustration 35).

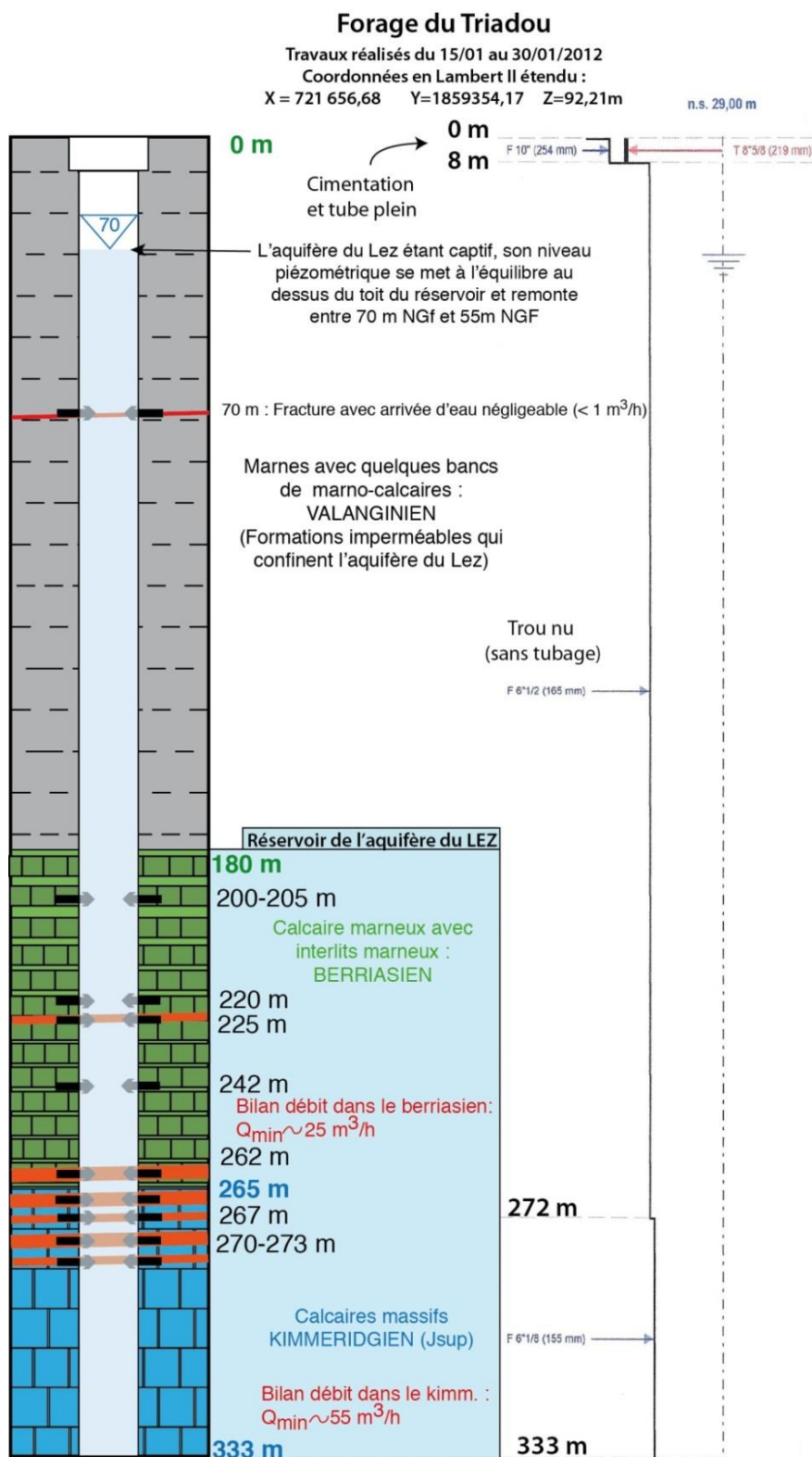


Illustration 35 : Logs géologique et technique du forage du Triadou (BSS 09903X0152/TRIADO ; les débits indiqués ont été estimés au soufflage durant la foration)

La coupe représentée sur l'illustration 36 permet de mettre en évidence que l'interface Berriasien – Jurassique supérieur où a été identifiée l'arrivée d'eau principale dans le forage du Triadou (notée D2 sur la coupe) pourrait être à l'origine de la géométrie observée au niveau du drain terminal de la source du Lez puisque la direction de cet

interface fortement karstifié (obtenu par le prolongement des couches géologiques selon les pentes observés) correspond également à la direction du drain terminal de la source du Lez. Une karstification importante se serait donc développée sur cet interface géologique comme le confirment les images de cette zone acquises via une caméra de forage – entre 265 et 270 m de profondeur.

Ceci confirme qu'au Miocène, suite aux événements tectoniques alpins et à la crise de salinité du Messinien, le potentiel de karstification a atteint son paroxysme, permettant la formation de karsts très profonds sous le niveau de la mer actuel et sur toute la région.

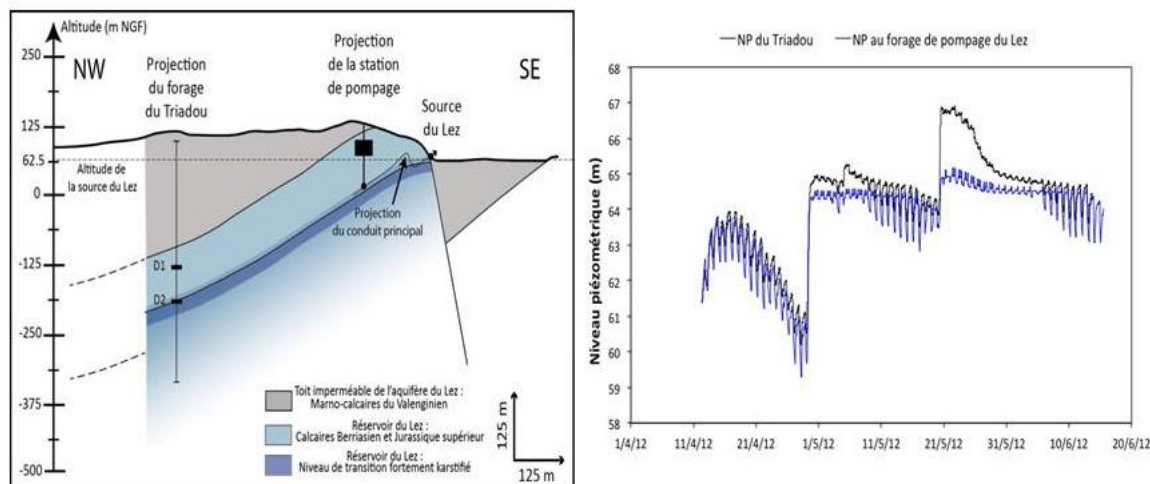


Illustration 36 : Coupe géologique NW-SE passant par la source du Lez et variations du niveau piézométrique observé sur le forage du Triadou (en noir) et à la source du Lez (en bleu) pour la période d'avril à juin 2012.

Conclusion et recommandation :

Le forage du Triadou permet d'attester de la persistance d'une forte karstification en profondeur, très probablement sous la forme d'un horizon karstifié au niveau de l'interface Berriasien - Jurassique supérieur recoupé aux alentours de -170 m NGF, horizon sur lequel se situe le drain terminal de la source du Lez. Cette information est importante en termes de prospection future pour une exploitation éventuelle à plus grande profondeur. Elle signifie que la karstification (et donc des vides et volumes d'eau associés) sont présents à très grande profondeur à proximité de la source, bien au-delà des observations précédemment disponibles (entre -25 et -35 m NGF en plongée et - 48 m NGF en sondage).

Il est recommandé d'instrumenter ce forage pour un suivi multi-niveaux en continu des variations de niveaux d'eau, température et conductivité électrique de l'eau au droit des principales arrivées d'eau identifiées.

4. Qualité et vulnérabilité de l'aquifère karstique du Lez

4.1. INTRODUCTION

Référence : rapport BRGM/RP--61013-FR

Les trois principaux objectifs de cette partie de l'étude sont :

- affiner les connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère karstique du Lez ;
- estimer les pressions anthropiques et leurs conséquences sur la qualité de l'eau de cet hydrosystème ;
- déterminer la vulnérabilité de l'écosystème souterrain associé au système karstique du Lez.

La synthèse des nouvelles données acquises dans le cadre de la thèse de Bicalho (2010) a permis de renforcer le schéma conceptuel de fonctionnement de l'aquifère karstique établi par Marjolet & Salado (1976). L'eau de la source du Lez apparaît composée d'un mélange de plusieurs types d'eaux issues de différents compartiments de l'aquifère, depuis (1) des circulations peu profondes au sein de l'aquifère « supérieur » (calcaires du Jurassique supérieur et du Berriasien), (2) des interactions avec les eaux de surface et influence des eaux ayant été en contact avec les marno-calcaires valanginiens, (3) des circulations profondes des eaux, notamment facilitées par la présence d'importantes failles mettant en contact l'aquifère supérieur avec l'aquifère inférieur du Jurassique moyen, et enfin (4) la remontée de fluides d'origine plus profonde. La contribution des pôles profonds (compartiments 3 et/ou 4), se manifeste graduellement lors des périodes estivales et de manière très significative lors des premières crues automnales, par une augmentation de la température et de la minéralisation des eaux du Lez : augmentation importante des teneurs en Cl, Na, B, Li, Sr, Mg et enrichissement en carbone-13 indiquant que ces eaux ont bien évolué en profondeur, en milieu fermé (Bicalho et al., 2012).

Caractériser le fonctionnement de l'aquifère karstique a nécessité tout d'abord de préciser l'origine des flux d'eaux minéralisées issues du pôle profond. Il a donc fallu mieux identifier le ou les pôles géochimiques participant aux écoulements. Cette caractérisation a été réalisée par une approche géochimique inédite basée sur l'analyse des éléments majeurs et traces, des Terres Rares et le traçage multi-isotopique (isotopes stables de l'eau et du carbone, isotopes du Strontium, du Bore et du Lithium).

D'autre part, il a été impératif de préciser les circulations peu profondes, les interactions entre les eaux de surface (notamment via les systèmes d'infiltration liés aux pertes) et les eaux souterraines mais également d'étudier les flux d'infiltration rapide, de façon à identifier les contaminations anthropiques pouvant affecter la qualité de la ressource en eau de ce système karstique. Ainsi, la matière organique naturelle (Carbone Organique Total et fluorescence naturelle), les coliformes totaux et E. coli, 16 pesticides susceptibles d'être présents au sein de cet hydrosystème, les organoétains, l'excès de Gadolinium et les résidus médicamenteux (carbamazépine et Epoxycarbamazépine) ont été suivis.

La vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère karstique est évaluée au moyen d'une approche cartographique.

Enfin, un état des lieux de la biodiversité souterraine présente sur le bassin versant du Lez et les enjeux de conservation subséquents, a été effectué. La vulnérabilité de l'écosystème du Lez a été estimée en intégrant des informations sur l'écologie et la qualité des eaux souterraines.

Les différentes informations concernant les protocoles de suivis, les sites échantillonnés (source du Lez, sources temporaires, forages et cours d'eau temporaires) et les méthodes analytiques sont détaillées dans le rapport BRGM/RP-61013-FR.

4.2. FONCTIONNEMENT HYDROGEOCHIMIQUE DE L'AQUIFERE

Référence : rapport BRGM/RP-61013-FR

4.2.1. Origine de l'eau à la source du Lez

Les paramètres physico-chimiques et la minéralisation de la source du Lez présentent d'importantes variations au cours du cycle hydrologique. L'eau des périodes hivernales présente globalement les plus faibles valeurs de conductivité électrique (CE) et de température. Une augmentation de CE et de température est observée en période de basses eaux qui coïncide également aux périodes de sollicitation des réserves du karst par les pompages. Des pics de minéralisation sont observés lors des épisodes de recharge importants qui se produisent en fin de période estivale. Ces périodes sont caractérisées par des augmentations de Cl, SO₄, Sr, Mg, Li, Ba et B.

L'approche géochimique couplant l'analyse des éléments majeurs et traces, des Terres Rares et le traçage multi-isotopique a permis d'améliorer significativement la caractérisation hydrochimique des réservoirs mis en jeu. L'origine des eaux minéralisées observées à la source du Lez lors des périodes de basses eaux et lors des crues de reprise hydrologique (effet piston) est bien d'origine profonde. L'étude des données isotopiques du Bore, Lithium et Strontium ne permet pas de montrer la participation des pôles Triasiques (halite et gypse), les signatures isotopiques étant largement dominées par une composante profonde en provenance du socle. Toutefois, les profils des Terres Rares des eaux de la source du Lez, malgré une signature proche du pôle « Crétacé », semblent évoluer entre le profil du Bajocien (Jurassique Moyen) et le profil fortement appauvri des eaux du pôle « Trias gypse ». Le pôle profond serait donc à relier à une composante d'eau de type carbogazeux en provenance du socle, ayant potentiellement interagi avec les niveaux évaporitiques du Trias au cours de sa remontée vers les aquifères du Jurassique. La contribution de ces eaux ne se fait pas de manière directe mais par l'intermédiaire d'un réservoir carbonaté profond dont l'eau présente une minéralisation élevée du type de celles qui ont été mesurées dans l'ouvrage profond d'Antigone (Bajocien). Dans ce contexte, les lignes de courant de l'aquifère mobiliseraient les eaux jusqu'à des profondeurs de plus de 1000 m compte tenu de la localisation de ces formations pour le système aquifère du Lez.

Un modèle de mélange de type EMMA (End-Member Mixing Analysis) a été appliqué sur les données hydrochimiques disponibles à la source du Lez entre le 16 juillet 2009 et le 18 octobre 2011, soit une série de 54 analyses d'éléments majeurs et traces. Les éléments considérés dans l'analyse sont les suivants : CE, Cl, SO₄, Sr, Mg, Na, et Li.

L'ensemble des analyses chimiques sur la période considérée sont relativement bien encadrées par les trois pôles géochimiques suivants :

- le pôle de l'aquifère crétacé ;
- le pôle de l'aquifère jurassique ;
- le pôle dit « profond » dont la signature géochimique a été optimisée.

Les compositions chimiques des trois pôles utilisés dans l'approche EMMA sont données dans le tableau suivant (Illustration 37). Il s'agit de compositions réellement observées pour les deux premiers pôles et d'une composition observée au forage profond Antigone pour le troisième, légèrement modifiée (baisse de la teneur en Li de 250 µg/l observée à Antigone à 20 µg/l dans le pôle utilisé).

Pôle géochimique	CE (µS/cm)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Sr (µg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Li (µg/l)
Jurassique	584	9,2	6,4	80	3,5	5,3	0,6
Crétacé	674	10,9	22,4	563	6,4	5,5	3,9
Profond	1700	300	90	1300	24	250	20

Illustration 37 : Compositions chimiques des pôles identifiés et utilisés dans l'approche EMMA

Les contributions relatives des trois pôles géochimiques sont représentées à l'illustration 38. On constate que le pôle Crétacé domine largement lors des périodes de hautes eaux lorsque la source déborde (Illustration 38b). Par contre, lorsque les pompages sollicitent les réserves de l'aquifère, la contribution du pôle Jurassique augmente jusqu'à prédominer (Illustration 38a). Elle diminue à nouveau brusquement lors de chaque période de recharge. En moyenne globale, la contribution du Crétacé aux flux est de 67% tandis que celle du Jurassique est de 24%. La contribution du pôle profond est globalement faible (en moyenne 9% des flux) avec des pics supérieurs à 20 % (un maximum observé de 27%) au moment des crues de reprise en automne.

Ce résultat indique le rôle prépondérant joué par la formation du pôle Crétacé (Berriasien) dans le fonctionnement de l'aquifère, notamment en période de hautes eaux durant lesquelles le ruissellement sur les marno-calcaires du Valanginien peut également contribuer, par le biais des zones de pertes des cours d'eau, à l'alimentation de la zone noyée du système karstique du Lez (voir § 4.2.2 sur les modalités de recharge).

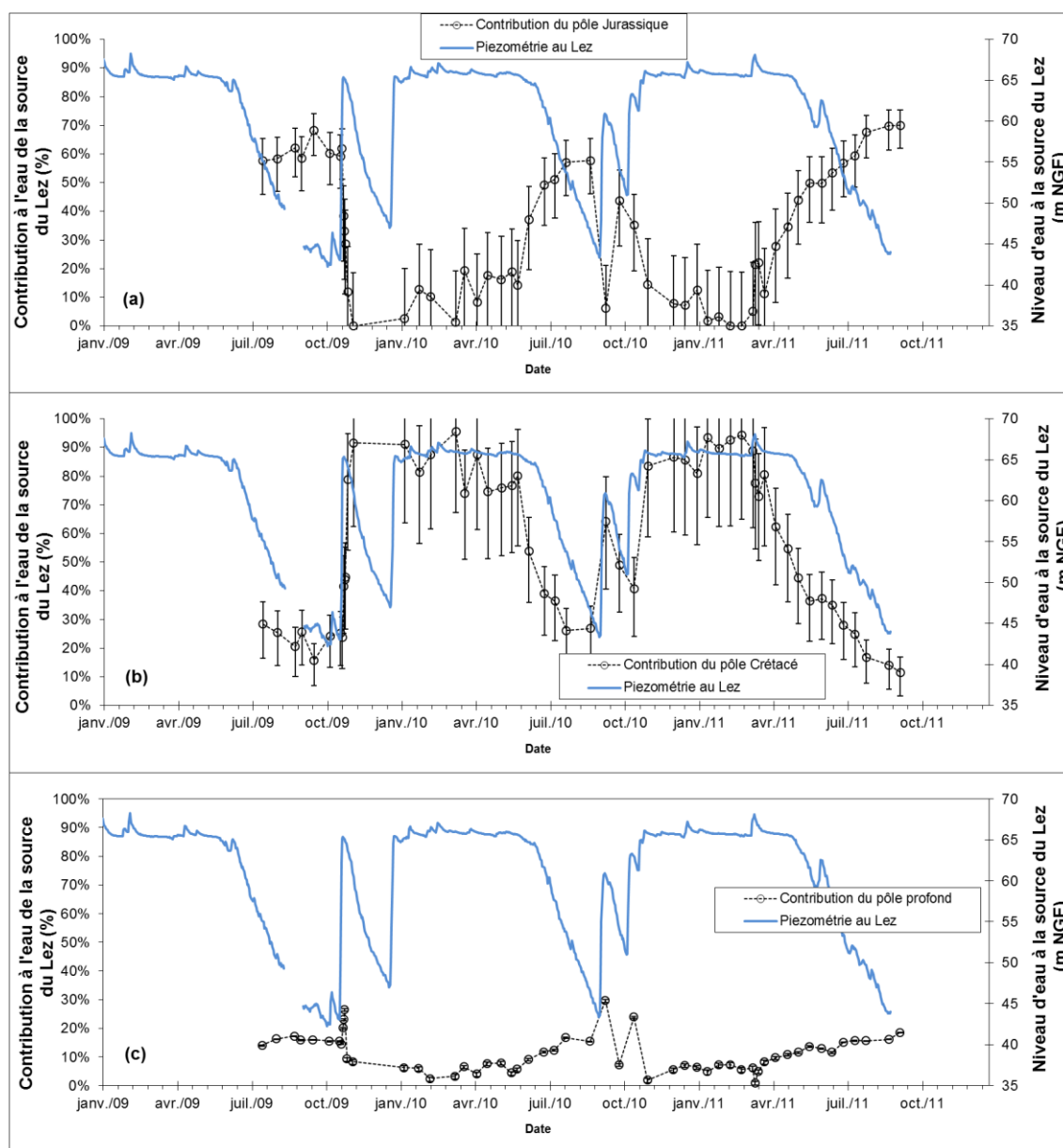


Illustration 38: Contributions relatives des trois pôles géochimiques aux eaux de la source du Lez sur la période d'étude (2009-2011)

4.2.2. Caractérisation des modalités de recharge

Des flux d'infiltration rapide ont été mis en évidence (NO₃, COT, coliformes totaux et *Escherichia Coli*), caractérisant la dynamique de recharge saisonnière de l'aquifère mais également sa potentielle vulnérabilité face à des pollutions d'origine anthropique (Illustration 39). Le COT, les nitrates, les coliformes totaux et fécaux varient généralement de façon opposée aux chlorures et traduisent l'écoulement d'eaux récemment infiltrées dans le système. Les teneurs en NO₃ restent relativement faibles (inférieures à 10 mg/l). Les coliformes totaux et *E. Coli* présentent de fortes concentrations en crue notamment, tout comme les teneurs en COT. Ceci met bien en évidence la contribution d'eaux d'infiltration rapide, ayant une origine naturelle (marquée par l'infiltration à travers le sol) et également une origine anthropique.

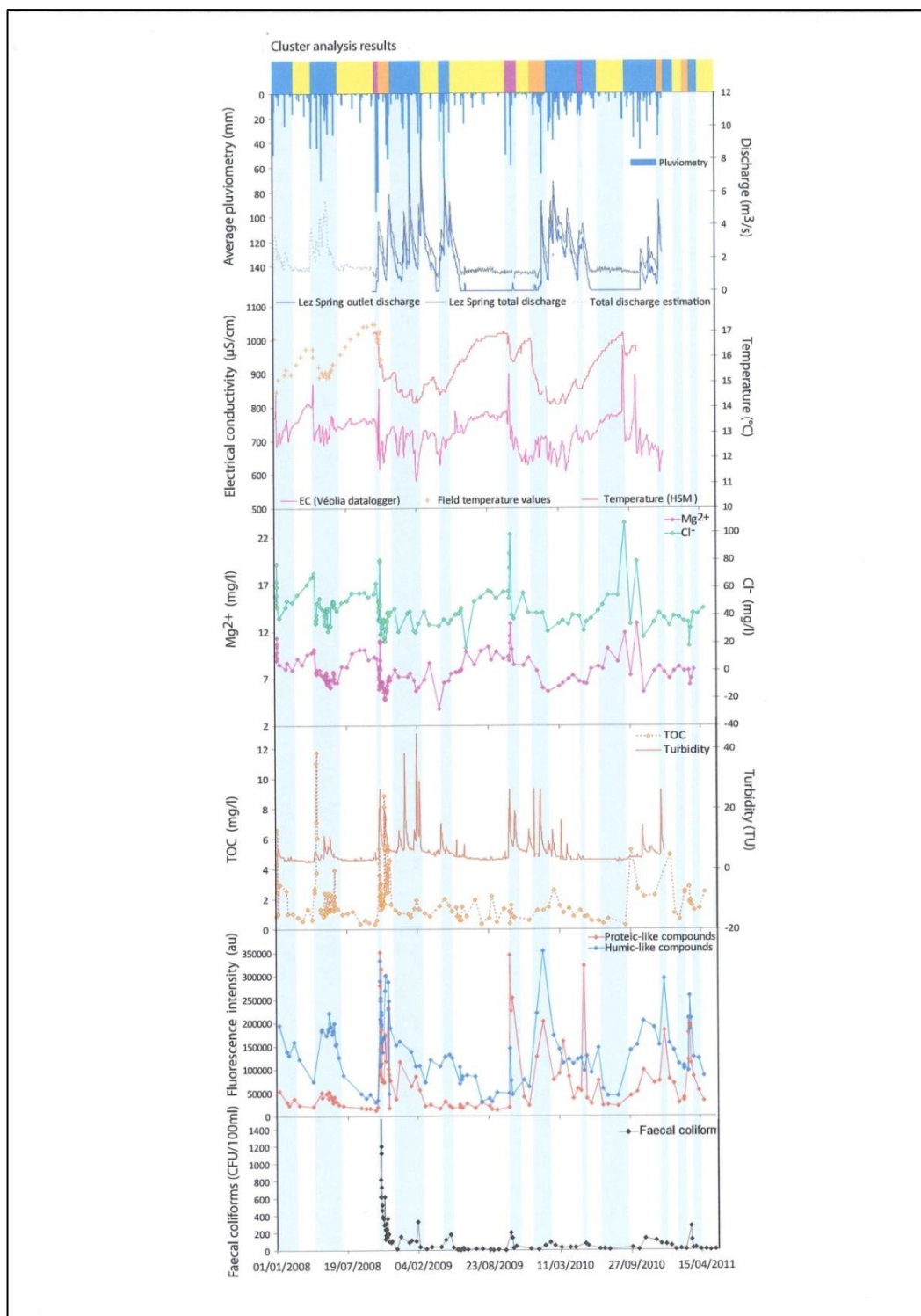


Illustration 39 : Evolution temporelle des paramètres débit, température, conductivité électrique, turbidité, Cl, Mg, COT, intensités de fluorescence et bactéries fécales (*E. coli*) à la source du Lez (Quiers et al., 2011)

Les modalités de recharge de l'aquifère ont été également étudiées grâce à la fluorescence de la matière organique dissoute (MOD), couplée à des traceurs des temps de séjour courts (bactéries fécales, carbone organique total - COT) et longs (Mg et Cl, dans le cas de la source du Lez, car les chlorures sont liés aux eaux minéralisées de la zone noyée et aux flux profonds). Ainsi, les composés de type humique sont des traceurs plus adaptés pour caractériser les flux d'infiltration rapide

en périodes de crues (Illustration 39). Les composés de type protéique semblent plutôt reliés aux bactéries fécales et donnent des informations sur les flux d'infiltration immédiate (inférieure à une semaine, temps de survie maximal des *E. coli*), ainsi que les contaminations anthropiques associées. Ces traceurs permettent donc de mettre en évidence les flux d'infiltration diffuse rapide et les interactions avec les eaux de surface (infiltration concentrée liée aux pertes) au sein de l'aquifère karstique.

Recommandation :

L'absence d'échantillonnage du pôle profond contribuant à la source du Lez ne permet pas de le caractériser précisément. L'analyse effectuée s'appuie sur la composition d'un forage profond n'existant plus (forage Antigone). La réalisation d'un forage profond (de l'ordre de 1500 m voire plus) situé par exemple entre la source du Lez et le Pli de Montpellier permettrait de préciser la nature des eaux profondes contribuant aux écoulements à la source du Lez.

L'outil de fluorescence de la MOD est très prometteur pour mieux caractériser la réactivité et la sensibilité de ce type d'aquifère face à d'éventuelles contaminations. De plus, les analyses en laboratoire de la fluorescence naturelle de la MOD (spectrofluorimétrie 3D) seront prochainement couplées avec un suivi en continu sur la source du Lez grâce à la mise en place d'un fluorimètre. Le signal enregistré en continu sera ainsi comparé à celui obtenu au laboratoire. Les données seront plus qualitatives que celles analysées en laboratoire, mais devraient permettre d'affiner les informations temporelles, en les couplant notamment aux mesures en continu de pression, température, conductivité électrique (sondes CTD).

Il est recommandé dès lors d'ajouter un fluorimètre au suivi actuel réalisé à la source du Lez, pour y mesurer en continu la fluorescence liée à la MOD et ainsi être en mesure de surveiller en continu la présence d'éventuelles contaminations.

4.3. QUALITE DE LA RESSOURCE EN EAU ET SENSIBILITE AUX IMPACTS ANTHROPIQUES

Référence : rapport BRGM/RP-61013-FR

Différents types de contaminants ont été suivis durant cette étude, de façon à caractériser les pollutions liées aux activités agricoles, urbaines et domestiques.

4.3.1. Impact des activités agricoles : suivi des pesticides

Les traitements phytosanitaires (traitements des maladies, désherbages, traitements contre les insectes,...) peuvent induire une pollution des eaux de surface ou des eaux souterraines par lessivage des sols. La culture de la vigne et de l'olivier sont caractéristiques des zones méditerranéennes. Ces cultures représentent l'essentiel des zones agricoles sur le bassin versant du Lez. Une liste de produits phytosanitaires pouvant potentiellement être retrouvés dans les eaux de surface et eaux souterraines, et ciblée sur ces cultures a été proposée suite à une étude bibliographique (Biesbrouck et al., 2009). Il s'agit donc d'un suivi ciblé sur les produits phytosanitaires potentiellement utilisés sur la zone d'étude en fonction du type de culture majoritaire préalablement identifié. Ce suivi n'est pas exhaustif et ne permet pas une évaluation de la teneur en pesticides totaux. Par ailleurs, il faut noter que les agriculteurs ne sont pas les seuls utilisateurs potentiels de ces produits : particuliers et collectivités peuvent en faire usage également.

Le laboratoire HSM a confié au LGEI de l'Ecole des Mines d'Alès l'analyse des 16 pesticides identifiés (Illustration 40). Le suivi a été mené de septembre 2010 à

septembre 2011, sur la base de 15 campagnes de prélèvements sur la source du Lez et sur les sources temporaires de Restinclières, Fleurette et du Lirou.

Composés	utilisation	N° CAS	Formule	Famille chimique
*Atrazine	Herbicide	1912-24-9	C ₈ H ₁₄ ClN ₅	Triazine
Azoxystrobine	Fongicide	131860-33-8	C ₂₂ H ₁₇ N ₃ O ₅	Strobilurine
Chlortoluron	Herbicide	15545-48-9	C ₁₀ H ₁₃ ClN ₂ O	Phenylurée
Déséthylatrazine (DEA)	Métabolite	6190-65-4	C ₆ H ₁₀ ClN ₅	Triazine
Déisopropylatrazine (DIA)	Métabolite	1007-28-9	C ₅ H ₈ ClN ₅	Triazine
*Diuron	Herbicide	330-54-1	C ₉ H ₁₀ Cl ₂ N ₂ O	Phenylurée
Flazasulfuron	Herbicide	104040-78-0	C ₁₃ H ₁₂ F ₃ N ₅ O ₅ S	Sulfonylurées
2-hydroxy atrazine	Produit de dégradation	2163-68-0	C ₈ H ₁₅ N ₅ O	Triazine
Imidaclopride	Insecticide	105827-78-	C ₉ H ₁₀ ClN ₅ O	Néonicotinoïdes
Isoproturon	Herbicide	34123-59-6	C ₁₂ H ₁₈ N ₂ O	Phenylurée
*Métalaxyl	Fongicide	57837-19-1	C ₁₅ H ₂₁ NO ₄	Acylalanines
*Oxadixyl	Fongicide	77732-09-3	C ₁₄ H ₁₈ N ₂ O ₄	Phenylamide
Penconazole	Fongicide	66246-88-6	C ₁₃ H ₁₅ Cl ₂ N ₃	Triazole
*Simazine	Herbicide	122-34-9	C ₇ H ₁₂ ClN ₅	Triazine
*Terbutylazine	Herbicide	5915-41-3	C ₉ H ₁₆ ClN ₅	Triazine
Terbutylazine déséthyl	Métabolite	30125-63-4	C ₇ H ₁₂ ClN ₅	Triazine

*Illustration 40 : Liste des pesticides sélectionnés pour cette étude. Les composés surlignés en gris font partie des 33 substances prioritaires définies par la DCE. * produits qui ne sont plus autorisés en France*

De plus, des échantillonneurs passifs (chemcatcheurs) en cours de développement méthodologique, ont été déployés ponctuellement sur le terrain, de façon à accumuler ces mêmes molécules pendant une durée prédéterminée (15 jours en moyenne). Ces dispositifs ont permis de confirmer la présence de certains composés, comme le métalaxyl, la simazine, la terbutylazine déséthyl, la terbutylazine et le diuron.

De façon générale, les résultats indiquent un niveau de contamination très faible (<25 ng/l contre 100 ng/l pour la norme de potabilité). Pour certains composés, les profils de concentration sont en relation avec une des activités saisonnières au niveau des herbicides par exemple.

Afin d'établir un état des lieux de contamination en pesticides de l'aquifère du Lez sur une période plus large, nous avons intégré les données issues des différents suivis patrimoniaux existant sur la source du Lez (données issues de la banque de données ADES sur les eaux souterraines). Nous n'avons considéré que les molécules étudiées durant notre suivi. Les résultats du suivi réalisé entre 1997 et 2011 à la source du Lez sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Molécule	Nombre de mesures	Concentration minimale ng/L	Concentration maximale ng/L	Concentration moyenne ng/L
2-hydroxy-desethyl-Atrazine	1	10	10	10
Azoxystrobine	65	5	25	15
Diuron	77	10	110	20
Flazasulfuron	58	10	50	29
Imidaclopride	70	10	25	21
Isoproturon	76	10	25	20
Métalaxyl	70	10	30	17
Oxadixyl	76	10	25	13
Penconazole	46	25	25	25
Simazine	72	10	100	20

Illustration 41 : Concentrations minimales, maximales et moyennes obtenues à la source du Lez pour les molécules étudiées. Période 1997-2011 (banque de données ADES)

Les prélèvements ont été effectués à différentes périodes du cycle hydrologique. Les concentrations moyennes et maximales observées sont en général faibles (respectivement <30 ng/l et 50 ng/l) pour l'ensemble des molécules. Ponctuellement, certaines molécules comme la simazine ou le diuron peuvent toutefois dépasser 100 ng/l.

A la vue de l'ensemble de ces résultats, l'aquifère du Lez ne semble pas présenter de contamination chronique en pesticides. Il est toutefois possible, notamment en période de crue, que certaines molécules dépassent la norme de potabilité fixée à 100 ng/l, pour les eaux destinées à la consommation humaine.

4.3.2. Impact de la contamination domestique

Outre les pressions anthropiques d'origine agricole, l'hydrosystème du Lez est également soumis aux contaminations urbaines et domestiques. Les substances polluantes véhiculées par les eaux usées traitées ou non semblent représenter l'essentiel de ces contaminations. Sur l'ensemble du bassin, différents types de points d'entrée peuvent être identifiés :

- les stations d'épuration (STEP) rejetant l'eau traitée dans les cours d'eau pérennes mais surtout temporaires constituant des zones vulnérables (§ 4.4), du fait de l'infiltration potentielle de ces substances dans le milieu souterrain, notamment via les pertes existantes et leur remobilisation lors des premières crues d'automne ;
- les fuites des réseaux des eaux usées ;
- dans une moindre mesure, les assainissements non collectifs défaillants et toutes les canalisations en PVC qui relarguent des organoétains...

Afin d'estimer l'impact de cette contamination sur l'hydrosystème du Lez, les composés organostaniques, le Gadolinium d'origine anthropique (indicateur d'une contamination liée à la présence d'eaux usées, Rabiet et al., 2009) et les résidus médicamenteux (carbamazépine et époxycarbamazépine) ont été suivis. L'étude de la fluorescence de la MOD couplée à la bactériologie fournit des informations sur les flux d'infiltration rapide (§ 4.2) mais également sur ce type de pollution.

Les composés organostanniques (OSn)

Les composés organostanniques appelés aussi organoétains ou OTs sont des dérivés organiques de l'étain tétravalent. Ils constituent des polluants exclusivement d'origine anthropique (Bueno, 1999). Les organoétains sont susceptibles d'être adsorbés sur les matrices solides. Ainsi, ils sont fortement sorbés sur les boues de stations d'épuration (STEP) qui peuvent présenter des concentrations de l'ordre du mg(Sn).kg^{-1} , et beaucoup moins dans les effluents liquides. Les composés organostanniques ne sont pas éliminés par les processus de biodégradation des stations d'épuration (Fent, 1989). Les eaux et boues de STEP contiennent quasi-systématiquement des butylétains (de quelques ng(Sn).L^{-1} à quelques centaines de $\mu\text{g(Sn).L}^{-1}$ dans les effluents) et fréquemment des octylétains et des phénylétains.

En conséquence, ces substances ont été introduites dans le Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ Eau) mais seul le tributylétain (TBT) a été retenu sur la liste des 33 substances prioritaires à surveiller (tableau de l'illustration 42) et à éliminer dans le milieu aquatique selon la directive cadre européenne (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du développement durable et de l'aménagement du territoire).

Substance	NQE-MA ($\mu\text{g/L}$)	NQE-CMA ($\mu\text{g/L}$)
Tributylétain	0,081 ng(Sn)/L	0,61 ng(Sn)/L

Illustration 42 : Moyenne Annuelle (MA) et Concentration Maximale Admissible (CMA) pour le Tributylétain dans les eaux selon les Normes Qualité Environnementale (NQE)

Les OTs sont utilisés dans de nombreux milieux et pour de nombreux usages dont certains directement en contact avec l'environnement et la ressource en eau. Ils sont activement surveillés pour plusieurs raisons :

- leur utilisation massive dans de nombreux milieux (usines de traitement de bois, peinture antisalissure des coques des bateaux, tuyaux en PVC,..., Bancon Montigny, 2001). Leur grande toxicité et fort pouvoir de bioaccumulation, notamment dans les organismes sans chaîne complexe et efficace de dégradation. Chez l'homme, seuls des cas de toxicité aigüe ont été relevés ;

- les organoétains se dégradent suivant une chaîne simple conduisant à la perte d'un groupement alkyl, *i.e.* le TBT se dégrade en DBT puis en MBT (Landmeyer, 2004). Ces dégradations ont pour conséquence de changer la toxicité et ses lieux d'atteinte ainsi que les lieux de fixation préférentielle sur les sédiments. Le TBT est la molécule la plus toxique des organoétains. De plus, sa grande utilisation en fait le produit le plus étudié et le plus surveillé.

Les OTs ont été analysés dans les sources du Lez, de Restinclières, de Fleurette et du Lirou (Illustration 43) et dans les effluents des stations d'épuration des Matelles, de Valflaunès et de Viols-le-Fort (Illustration 44). Seuls les butylétains ont été détectés et donc quantifiés.

Les butylétains sont présents dans tous les échantillons analysés, exceptés les échantillons prélevés le 26/04/2011. La concentration en TBT dépasse la NQE-CMA pour l'échantillon du Lez du 28/03/2011, pour deux échantillons de la source de Restinclières (27/05/2010 et 11/04/2011) et pour les effluents de la STEP des Matelles.

Le monobutylétain (MBT) est présent dans tous les échantillons et le plus souvent présente des concentrations importantes.

	LEZ			Restinclières			Fleurette			Lirou		
	concentrations (ng(Sn)/L)											
DATE	MB T	DBT	TBT	MBT	DBT	TBT	MBT	DBT	TBT	MB T	DBT	TBT
08/03/2010										1,66	0,1 0	0,0 3
27/05/2010	1,11	0,1 0	0,2 5	0,35	0,09	0,78						
24/08/2010	0,43	0,1 1	0,2 2							0,45	0,0 6	0,1 1
04/11/2010	1,93	0,1 4		1,45	0,12		1,46	0,12	0,15			
01/03/2011	1,81			1,47	0,04							
14/03/2011	1,70			1,51	0,04					0,98		
17/03/2011	1,66			1,60			1,51			0,94		
21/03/2011	1,66			1,52			1,56			1,01		
28/03/2011	1,52		0,7 2	1,54			1,49			0,99		
11/04/2011	1,44		0,2 5	1,44		0,65						
26/04/2011				1,51								
09/05/2011	1,49			1,41								
07/06/2011	1,47			3,61								
20/06/2011	3,63	0,1 4										
04/07/2011	1,63	0,9 4										
19/07/2011	1,40											

Illustration 43 : Suivi des concentrations des butylétains dans les sources du Lez, de Restinclières, de Fleurette et du Lirou ; les concentrations supérieures au NQE-CMA sont reportées en rouge

		concentrations (ng(Sn)/L)		
STEP		MBT	DBT	TBT
Les Matelles	09/02/2011	0,73	0,35	1,12
Valflaunes	09/02/2011	1,63	0,22	0,17
Viols-le-Fort	09/02/2011	1,51	0,29	0,25

Illustration 44 : Concentration en butylétains dans les rejets de trois STEP du bassin d'alimentation du Lez.

Comme le dibutylétain, le MBT provient principalement de la dégradation du TBT, mais peut avoir une origine propre. Il est donc difficile d'évaluer la part de MBT provenant de la dégradation du TBT mais tout comme le Gadolinium, la présence des butylétains dans les eaux traduit la présence d'eaux usées ou d'effluents de STEP.

Malgré le peu d'échantillons analysés, les sources de Fleurette et du Lirou paraissent peu impactées par les organoétains.

L'anomalie de Gadolinium

Les Terres Rares (REE) sont des éléments naturellement présents à l'état de trace dans les eaux naturelles superficielles et souterraines : leur concentration dans les eaux est principalement héritée de l'interaction eau-roche. Cette signature correspond au bruit de fond géochimique naturel en terres rares des eaux. Occasionnellement, leur distribution naturelle peut être modifiée par des apports d'origine anthropique. Cette perturbation, rencontrée essentiellement dans les zones densément peuplées et les régions industrialisées, consiste principalement en une anomalie positive de Gadolinium (Gd), une des 14 terres rares. Le Gadolinium naturel présente de très faibles concentrations dans les eaux, variant de 0,1 ng/l en contexte karstique à 2 ou 3 ng/l en contexte granitique.

Gd est utilisé comme agent contrastant en Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). Administré par injection aux patients subissant des IRM (en moyenne 1 g de Gd par patient), il est rapidement excrété et rejeté dans les effluents hospitaliers ou dans le réseau de collecte des eaux usées. La concentration de Gd d'origine anthropique dans les effluents de stations d'épuration (STEP) peut ainsi être de 2 à 1000 fois supérieure aux concentrations naturelles de Gd, de l'ordre de 1 à 100 ng/l. Lorsque des eaux souterraines sont impactées par l'infiltration d'eaux usées, elles peuvent présenter une anomalie positive de Gadolinium, révélatrice de la présence involontaire ou volontaire d'eaux usées (Rabiet et al., 2009).

La détermination de Gd dans les eaux souterraines du bassin du Lez a donc pour objectif de mettre en évidence des éventuelles concentrations anormales, témoin de la présence ou de l'infiltration d'eaux usées dans les différents compartiments aquifères. Les profils de REE normalisés⁵ pour la campagne d'été d'août 2010 sont présentés à l'illustration 45.

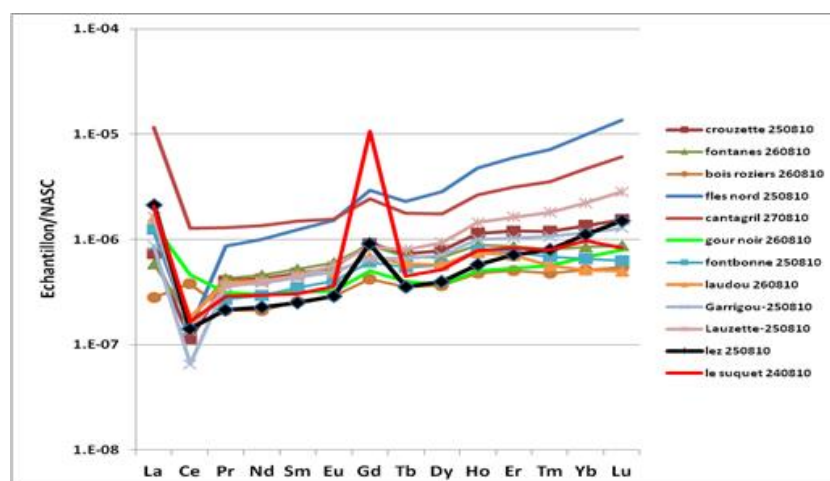


Illustration 45: Campagne d'été d'août 2010- profils des REE dans les eaux

⁵ Le lecteur trouvera des détails et explications sur le mode de représentation des profils REE dans le rapport BRGM/RP-61013-FR (Batiot-Guilhe et al. 2014)

Deux échantillons, la source du Lez et le forage du Suquet, montrent des anomalies de Gadolinium d'origine anthropique ($Gd^* = 2,86$ et $26,75$ respectivement). Ces anomalies traduiraient une contamination d'origine anthropique par les effluents de STEP ou des rejets d'assainissement autonomes ou des fuites du réseau d'assainissement.

Plus généralement (Batiot-Guilhe et al. 2014), à part les anomalies importantes mesurées dans les stations d'épuration, peu d'échantillons montrent une anomalie de Gd d'origine anthropique qui est par ailleurs faible: Crouzette du 25/05/2011 ($Gd^* = 1,62$), source du Lez (02/09/2009, $Gd^*=1,56$; 25/08/2010, $Gd^*=2,86$), source de Restinclières (20/12/2010, $Gd^*=1,57$; 17/03/2011, $Gd^*=1,58$). Seul le forage pour AEP du Suquet, prélevé en août 2010, présente une importante anomalie de Gd ($Gd^* = 26,75$) qui atteste la présence d'eaux usées.

Les résidus médicamenteux

Lorsque les molécules utilisées à des fins thérapeutiques ou de diagnostic ne sont pas totalement dégradées dans l'organisme, elles sont excrétées principalement dans les selles et les urines sous leur forme initiale ou sous la forme d'un ou plusieurs métabolites. Ces résidus de médicaments humains ou vétérinaires peuvent, après plusieurs étapes, être rejetés dans le milieu naturel. A noter que sur le bassin hydrogéologique du Lez, les activités d'élevages agricoles sont peu développées et que par conséquent ce sont les rejets d'origine humaine qui représentent l'essentiel des résidus médicamenteux.

Parmi ces résidus de médicaments, la carbamazépine (et son métabolite, l'époxycarbamazépine) est généralement l'un des plus fréquemment détectés dans l'environnement aquatique, bien qu'elle soit excrétée non métabolisée en seulement quelques pour cents. La carbamazépine est connue comme étant une molécule peu éliminée dans les stations de traitement par boues activées, les pourcentages d'élimination étant inférieurs à 20 %. Dans les eaux de surface et souterraines, la carbamazépine est fréquemment retrouvée dans des gammes de concentration allant de quelques dizaines à quelques centaines de ng/L. La carbamazépine a été proposée comme marqueur des eaux usées, les apports au milieu étant liés à son usage en thérapeutique humaine (Clara et al., 2004). Le traceur carbamazépine aurait un caractère prédictif par rapport à la présence d'autres médicaments.

Les résultats du suivi effectué sur les quatre sources principales du bassin du Lez sont présentés à l'illustration 46.

Pour la plupart des points échantillonnés à différentes périodes du cycle hydrologique (Illustration 46), les teneurs en carbamazépine et époxycarbamazépine sont inférieures à la LD ou LQ (respectivement 10 et 5 ng/l). La source du Lez présente cependant des teneurs ponctuellement supérieures à 10 ng/l en carbamazépine, notamment en hautes et moyennes eaux. A part l'échantillon de la source de Restinclières du 11/04/11, les sources temporaires présentent des valeurs inférieures aux seuils de détection ou de quantification. Ainsi, l'aquifère karstique du Lez semble peu impacté par les résidus médicamenteux. Les valeurs supérieures à 10 ng/l mesurées à la source du Lez restent très faibles pour la carbamazépine. L'impact de la contamination des eaux souterraines par les résidus médicamenteux est donc très restreint, même si ponctuellement des « pics » de carbamazépine indiquent une contamination de la source du Lez par des eaux usées.

Source	Date	Carbamazépine	Epoxycarbamazépine
		ng/l	ng/l
Source du Lez	07/04/10	<LQ	nm
Source du Lez	20/04/10	<LQ	nm
Source du Lez	07/05/10	19,32	nm
Source du Lez	20/05/10	5,5	nm
Source du Lez	27/05/10	< LQ	nm
Source du Lez	17/01/11	< LD	< LD
Source du Lez	31/01/11	< LD	< LD
Source du Lez	28/02/11	< LD	< LD
Source du Lez	14/03/11	6,0	< LD
Source du Lez	21/03/11	5,0	< LD
Source du Lez	28/03/11	< LD	< LD
Source du Lez	11/04/11	< LD	< LD
Source du Lez	26/04/11	< LD	< LD
Source du Lez	09/05/11	< LD	< LD
Source du Lez	23/05/11	10,1	<LQ
Source du Lez	07/06/11	19,1	<LQ
Source du Lez	20/06/11	15,3	<LQ
Source du Lez	18/07/11	11,8	<LQ
Source du Lez	29/08/11	7,2	<LQ
Restinclières	17/03/11	< LD	< LD
Restinclières	21/03/11	< LD	< LD
Restinclières	28/03/11	< LD	< LD
Restinclières	11/04/11	22,1	3,0
Restinclières	26/04/11	< LD	< LD
Restinclières	09/05/11	< LD	< LD
Restinclières	23/05/01	< LD	< LD
Restinclières	07/06/11	< LD	< LD
Fleurette	21/03/11	< LD	< LD
Lirou	17/03/11	< LD	< LD
Lirou	21/03/11	< LD	< LD

Illustration 46 : Concentrations en carbamazépine et époxycarbamazépine pour les quatre sources.

LD : Limite de détection et LQ : Limite de quantification

Conclusion

Les anomalies de Gadolinium, les composés organostaniques et les résidus médicamenteux (carbamazépine et époxycarbamazépine) présentent des valeurs en général faibles sur l'ensemble des sites suivis (sources, forages) sur l'hydrosystème karstique du Lez ou sur les systèmes karstiques voisins pouvant être liés à ce dernier. Toutefois, la présence ponctuelle de ces composés d'origine anthropique dans les eaux souterraines atteste de l'impact de rejets d'eaux usées traitées ou non issus des STEP et/ou des assainissements présents sur le bassin. Les pics de contamination apparaissent généralement en hautes ou moyennes eaux et sont plus visibles sur les

sources. Leur suivi a été en effet effectué de façon régulière à différentes périodes du cycle hydrologique, ce qui n'est pas le cas des forages, prélevés uniquement à l'étiage. La source du Lez présente des valeurs généralement plus élevées que celles des sources temporaires (Lirou, Fleurette, Restinclières). L'étude de la fluorescence de la MOD couplée à la bactériologie (notamment *E. Coli*, § 4.2.2) a montré que l'impact de la contamination domestique pouvait être important, au moment des crues de reprise automnale. La mise en évidence de flux d'infiltration rapide arrivant à l'exutoire de la source du Lez en quelques jours démontre la vulnérabilité de cette dernière face à des flux de contaminants anthropiques, principalement liés à la pollution domestique. Des informations complémentaires quant à la localisation, les flux de rejets des STEP et la vulnérabilité de l'aquifère seront présentées ci-dessous (§ 4.4).

4.3.3. Faune stygobie

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet a permis de réactualiser la liste des espèces stygobies présentes sur le karst d'alimentation de la source du Lez, considéré comme l'un des plus riches au monde (Malard, 1997). De nombreuses récoltes supplémentaires ont permis d'améliorer les connaissances sur la micro-répartition des mollusques stygobies et, de là, de proposer un schéma théorique liant ces répartitions aux hydrosystèmes (Prié, 2008). Les mollusques souterrains peuvent donc être utilisés comme traceurs des eaux souterraines.

Pour affiner cette approche, des analyses génétiques ont été menées sur les rares animaux récoltés vivants, qui mettent en lumière des divergences fortes entre les populations présentes sur le karst du Lez et celles des bassins-versants adjacents, renforçant l'hypothèse d'une répartition guidée par les grands systèmes hydrologiques. En termes de conservation, les enjeux sont renforcés par la découverte du caractère endémique d'espèces comme *Paladilhia pleurotoma*, *Moitessieria rolandiana* et *Islamia cf. globulina* que l'on croyait largement répandues. Les analyses génétiques montrent qu'elles sont restreintes au karst du Lez.

Pour pallier au problème de la rareté des individus vivants dans les récoltes, une approche novatrice par ADN environnemental a été menée pour caractériser les eaux souterraines par leur signature génétique. Les résultats intermédiaires doivent être affinés, mais d'ores et déjà la technique paraît prometteuse.

Enfin, nous avons tenté de définir la vulnérabilité de ces espèces aux changements de qualité de l'eau. Nous ne parvenons pas à montrer que ces espèces soient franchement liées à des valeurs seuils des caractéristiques physico-chimiques étudiées ici, même si des tendances générales montrent qu'elles pourraient être sensibles aux valeurs traduisant l'influence anthropique. En revanche, elles semblent étroitement liées à la rapidité de transit des eaux issues de la recharge : plus les eaux de pluie pénètrent rapidement dans le karst, plus elles sont susceptibles d'apporter des éléments organiques et de l'oxygène, nécessaires au développement des biocénoses stygobies.

4.3.4. Conclusion

La ressource en eau de l'aquifère karstique du Lez est de bonne qualité chimique dans l'ensemble, mais de qualité bactériologique pouvant être ponctuellement médiocre. Les principaux contaminants présents en quantités pouvant être importantes, notamment en période de crues, attestent d'une contamination par des eaux usées (fuite de réseau de collecte, assainissements autonomes défaillants, rejets de STEP).

La présence de certaines STEP localisées en zones de vulnérabilité globale très élevée (voir § 4.4.4), à proximité des pertes, semble être une cause de ces pollutions temporaires des eaux souterraines et plus particulièrement de la source du Lez. Ces dernières se trouvent non loin de la zone de faille des Matelles-Corconne qui constitue un axe de drainage préférentiel des eaux souterraines vers la source du Lez, impliquant une plus forte vulnérabilité par rapport aux autres sources du système.

Par ailleurs, d'un point de vue de la faune stygobie, le karst du Lez est un haut lieu de biodiversité souterraine, dont les enjeux de conservation sont importants, et qui semble relativement épargné par les influences anthropiques jusqu'à présent.

Recommandation :

Le bon fonctionnement des systèmes d'assainissement (réseaux de collecte, STEP, assainissement autonome) situés dans le bassin hydrogéologique de la source du Lez est un enjeu majeur pour la préservation de la ressource. Le suivi de ce fonctionnement pourrait se faire à travers un observatoire en s'appuyant sur les outils en place.

L'analyse du fonctionnement permettra d'adapter le suivi et de proposer le cas échéant un renforcement du programme d'autocontrôle et des rejets hors zone sensible. La carte de vulnérabilité intrinsèque (§ 4.4) permet de prioriser les actions en sélectionnant les STEP sur lesquelles il faut agir en priorité.

L'utilisation des échantillonneurs passifs (de type chemcatchers ou POCIS) testés sur le bassin pourrait être étendue à la source du Lez ainsi que sur certains forages pour caractériser la dynamique de transfert des produits phytosanitaires.

4.4. VULNERABILITE INTRINSEQUE

Référence : rapport BRGM/RP-61013-FR

4.4.1. Introduction et définitions

La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque a été réalisée selon la méthode PaPRIKa qui a fait l'objet d'un guide méthodologique (ONEMA-BRGM) (Dörfliger et al., 2010 ; BRGM RP-57527-FR). La **vulnérabilité intrinsèque** est définie comme étant le terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités anthropiques. C'est une propriété générale, non mesurable et sans dimension.

Deux distinctions doivent également être faites, d'une part la vulnérabilité de la ressource et d'autre part la vulnérabilité de la source, exutoire concentrant les écoulements souterrains (Illustration 47). La **vulnérabilité de la ressource**: il s'agit de caractériser la vulnérabilité du transfert potentiel du contaminant au sein de la zone d'infiltration jusqu'à la surface de l'eau souterraine. Il s'agit de caractériser des zones qui influencent la qualité de l'eau à la source, de manière permanente, constituant un bruit de fond (pollution diffuse). La **vulnérabilité de la source** ou du captage doit être caractérisée en prenant en considération les caractéristiques du transit vertical et horizontal jusqu'à l'exutoire du système. Il s'agit d'identifier des zones plus vulnérables vis-à-vis de pollutions accidentelles et qui vont permettre le transit rapide et massif vers le captage (source, forage).

PaPRIKa dont l'acronyme signifie « **P**rotection des **a**quifères karstiques basée sur la **P**rotection, le **R**éservoir, l'**I**nfiltration et le degré de **K**arstification », est une méthode multicritère à index avec système de pondération dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques.

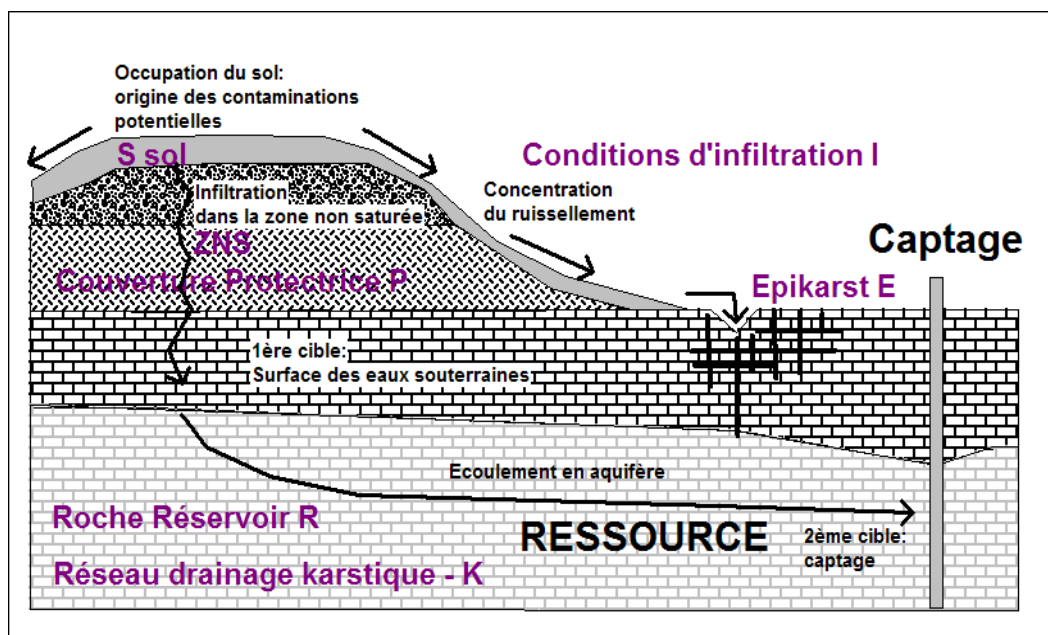


Illustration 47: Schéma conceptuel d'un aquifère karstique avec le positionnement des différents critères (d'après COST 620, Zwahlen et al.2004)

La méthode PaPRIKa est une méthode de cartographie à index à pondération des critères. Le choix des critères est en adéquation avec la spécificité en termes de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques. Les critères sont au nombre de 4, à savoir (i) le critère P pour couverture protectrice résultant de la combinaison la plus protectrice entre les critères S Sol s.l., la lithologie, l'épaisseur et la fracturation de la zone non saturée (ZNS) et le critère E pour fonctionnement épikarstique, (ii) le critère R pour la nature de la roche du réservoir souterrain, (iii) le critère I pour la nature de l'infiltration (diffuse ou ponctuelle au niveau de phénomènes exokarstiques) et (iv) le critère Ka pour le degré de karstification et le fonctionnement du système karstique (Illustration 47 et Illustration 48).

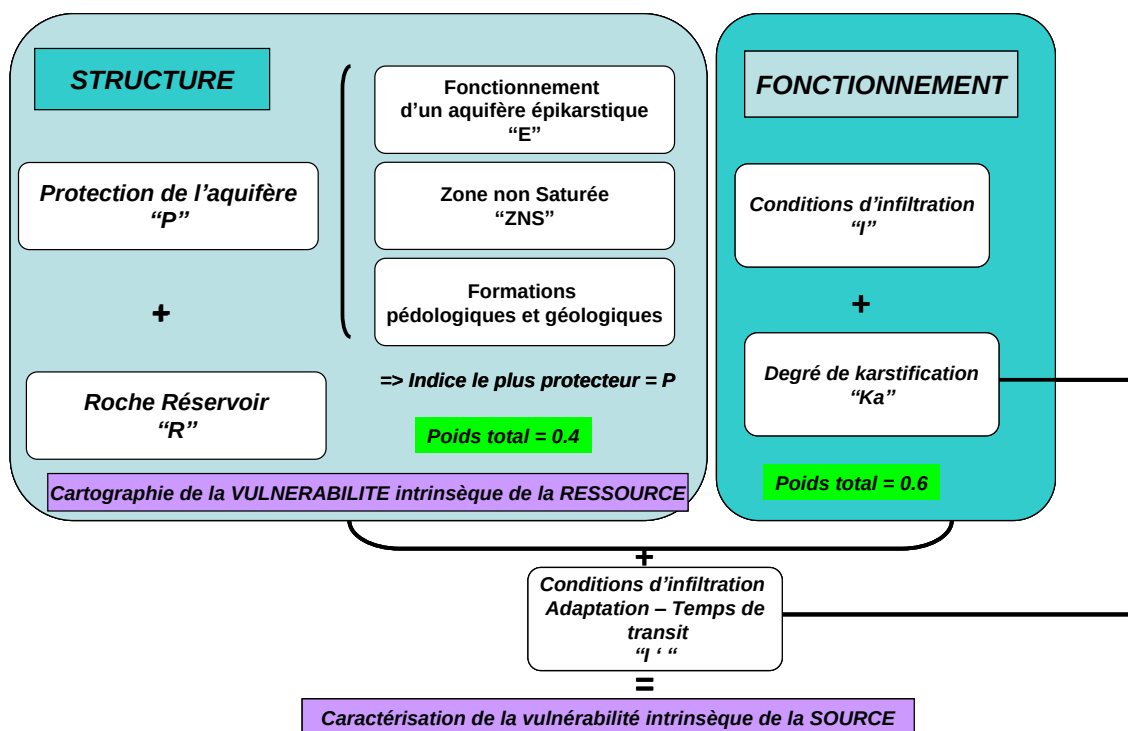


Illustration 48 : Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques

4.4.2. Zone d'étude

La zone d'étude du projet Lez-GMU a été définie comme l'enveloppe supérieure entre le périmètre de protection éloigné et le bassin hydrogéologique anthropisé (sous l'effet des pompages) défini par Bérard (1983), hormis au sud du captage où ce bassin hydrogéologique présumé s'étend sous couverture et où la zone d'étude a été en conséquence limitée au périmètre de protection éloigné (Illustration 49). Cette extension importante de la zone d'étude (superficie : 495 km²) permet de renseigner la vulnérabilité dans la totalité du périmètre de protection éloigné ainsi que sur certaines zones extérieures situées dans le bassin hydrogéologique présumé.

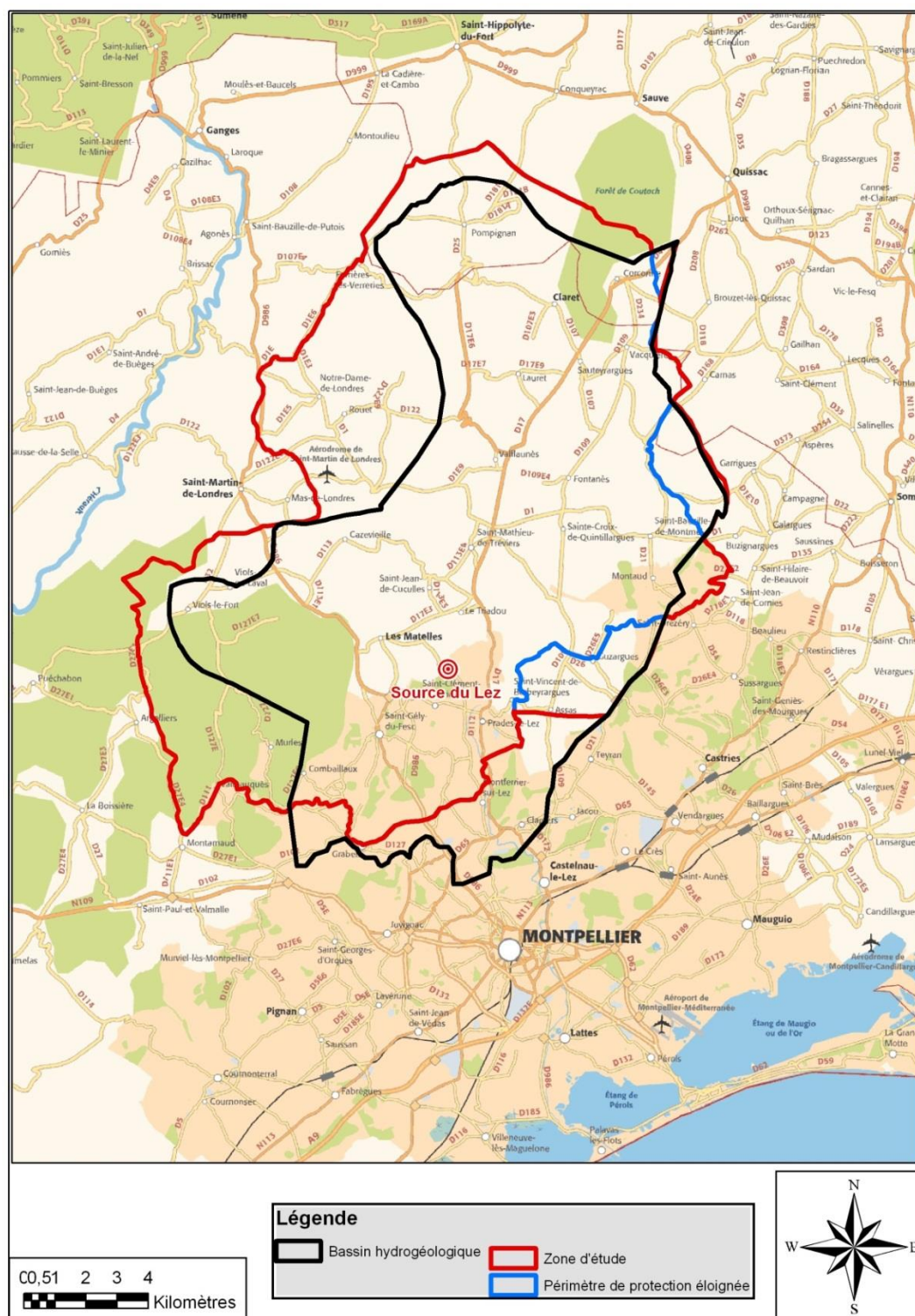


Illustration 49: Délimitation de la zone d'étude pour la cartographie de la vulnérabilité

4.4.3. Résultats : carte de vulnérabilité

La carte de vulnérabilité globale (Vg) de l'aquifère du Lez, déterminée sur l'emprise de la zone d'étude définie au § 4.4.2, est représentée à l'illustration 50.

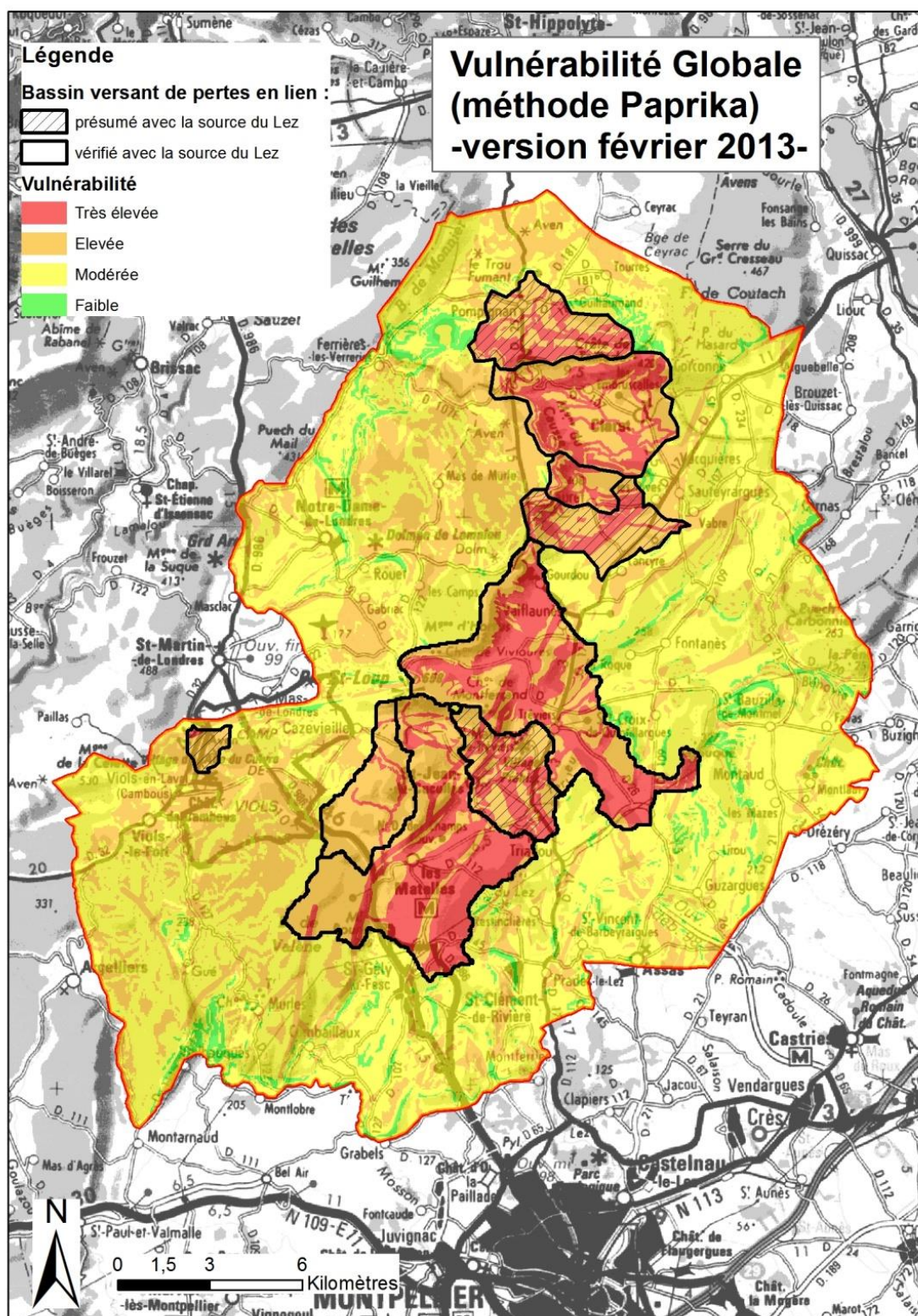


Illustration 50 : Carte de la vulnérabilité globale (Vg) à l'échelle de la zone d'étude

La classification selon l'indice Vg est représentée au tableau de l'illustration 51.

Valeurs indice	Classe	Vulnérabilité	Pourcentage
3,2 – 4	4	Très élevée	11,5
2,4 – 3,19	3	Elevée	49,6
1,6 – 2,39	2	Modérée	35,1
0,8 – 1,59	1	Faible	3,8
0 – 0,79	0	Très faible	0

Illustration 51: Tableau des classes de vulnérabilité globale et pourcentages surfaciques dans la zone d'étude

Les zones les plus sensibles sont toutes localisées dans les bassins versants des pertes et correspondent soit aux terrains argileux, marneux et marno-calcaires qui vont assurer un ruissellement efficace vers les zones de perte, soit aux zones de failles principales qui vont permettre une infiltration rapide de tout polluant vers la ressource en eau.

Près de la moitié du bassin versant est classée en vulnérabilité élevée (49,6 %, Illustration 51). Dans la région, de nombreux secteurs possèdent une couverture de faible épaisseur et sont pour la plupart localisés sur des terrains calcaires, relativement fracturés, avec localement des zones de perte. Ces terrains sont propices à l'infiltration.

Les secteurs de vulnérabilité moins élevée sont localisés dans la partie Est/Sud-Est du bassin hydrogéologique où les pertes sont moins présentes et les terrains sont d'avantages marneux. Dans ces secteurs, le risque est le plus faible pour les terrains ou les pentes sont relativement fortes, favorisant le ruissellement de l'eau au détriment de l'infiltration.

Recommandation :

Les périmètres de protection actuels tels que définis dans la DUP de 1981, comportent trois périmètres, à savoir un périmètre de protection immédiate autour du captage, un périmètre de protection rapprochée englobant ce dernier et d'une forme polygonale d'une largeur maximale d'environ 1,25 km et finalement un périmètre de protection éloignée comprenant une grande partie du bassin hydrogéologique proposé par Bérard (1983). Ces périmètres ne comprennent pas à l'heure actuelle de périmètres satellites pouvant se rattacher à la définition du périmètre de protection rapprochée.

En termes de perspectives, des modifications du périmètre de protection éloignée peuvent être proposées suite aux résultats du projet et de la cartographie de la vulnérabilité. Des secteurs situés dans la partie nord-est du bassin hydrogéologique pourraient être intégrés au périmètre de protection éloignée (Illustration 52), ces secteurs étant caractérisés par une vulnérabilité élevée à modérée de manière générale.

De plus, les secteurs de très forte vulnérabilité présents essentiellement dans la partie nord du bassin d'alimentation, correspondant à des bassins versants de perte avec la présence de terrains argileux, marneux et marno-calcaires en faveur du ruissellement efficace vers les zones de perte, pourraient faire l'objet de périmètres satellites de protection rapprochée, avec une restriction de certaines activités comme celles de nature à porter atteinte à la qualité de l'eau, qu'elles soient réglementées voire interdites.

Certains avens et gouffres pourraient faire l'objet de périmètres satellites de protection immédiate de façon à clôturer ces zones sensibles.

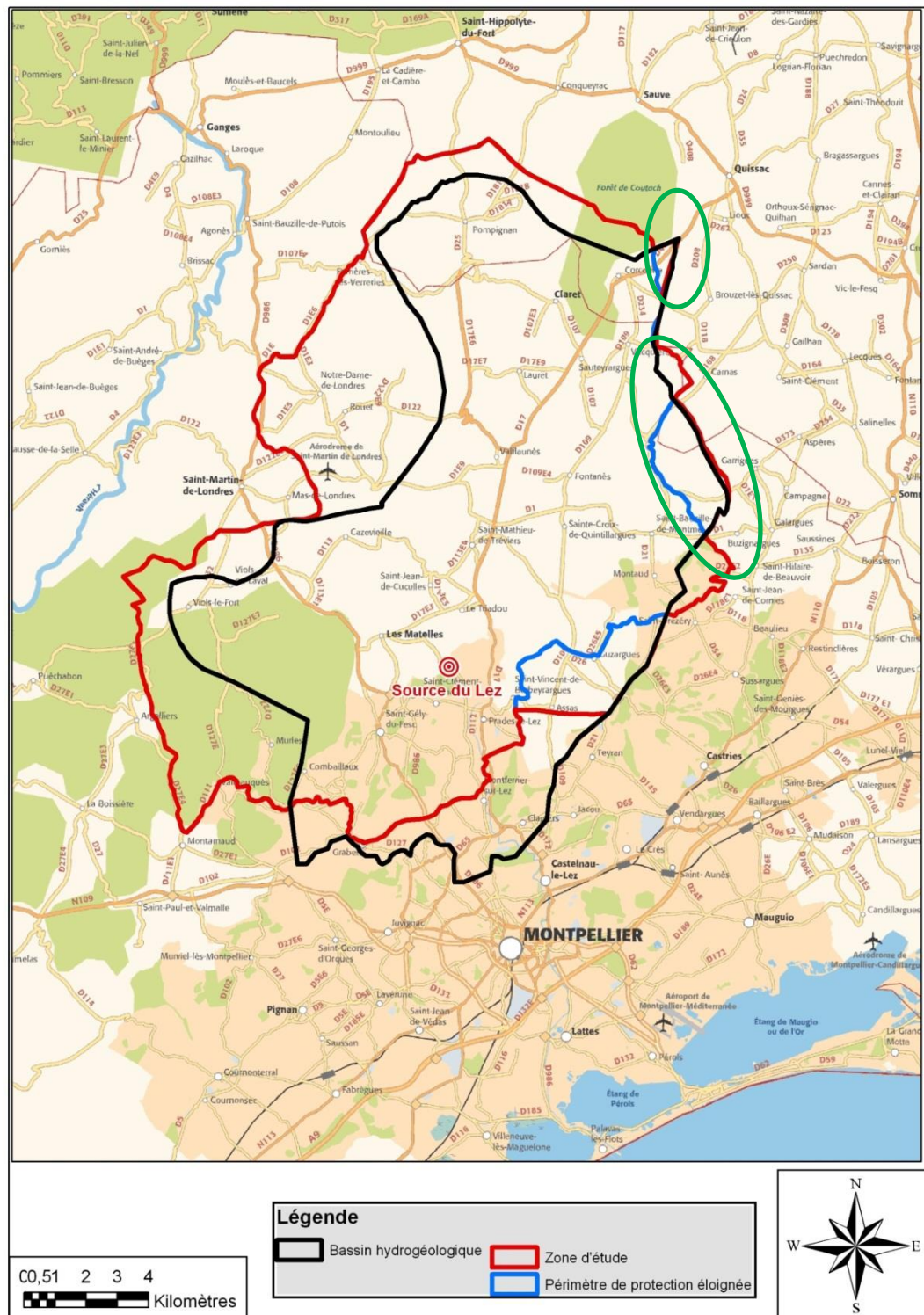


Illustration 52 : Proposition d'extension du périmètre de protection éloignée (ellipses vertes)

4.4.4. Occupation du sol et aléas

L'objectif est de rassembler les données récentes d'occupation du sol disponibles à l'échelle du bassin d'alimentation. Les deux objectifs qui en découlent sont d'en faire

une analyse temporelle et de les croiser avec les valeurs de vulnérabilité. En complément, une cartographie des rejets des STEP croisée avec la vulnérabilité et les zones de pertes a été produite.

Sources de données

Des données ont été notamment mobilisées auprès de l'INSEE (population), du SATESE de l'Hérault et du Système d'Information sur l'Eau (stations d'épuration). Pour l'occupation du sol, deux principales sources de données ont été utilisées. D'une part, les données Corine Land Cover (CLC) de 1990, 2000 et 2006, bien que relativement peu précises, permettent d'analyser l'évolution de l'occupation du sol, et notamment de l'urbanisation sur la zone d'étude. D'autre part, les données de la DRAAF LR, plus précises permettent de fournir une cartographie plus détaillée et plus récente de l'occupation du sol.

La comparaison des sources de données permet notamment de mettre en évidence l'influence sur les résultats de l'échelle de restitution, en l'occurrence plus fine pour les données DRAAF LR que pour les données CLC : l'illustration 53 montre que les zones artificialisées, et en particulier les routes, sont sous estimées par les données CLC.

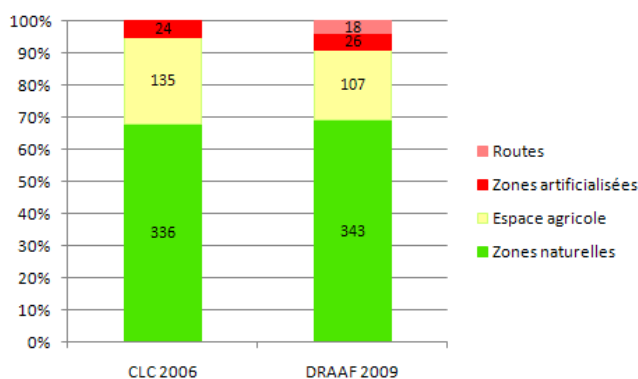


Illustration 53 : Occupation du sol : comparaison des statistiques exprimées en % et en km² pour les données CLC 2006 et DRAAF LR 2009 (agrégées respectivement en 3 et 4 classes)

Evolution de l'occupation du sol et urbanisation

L'analyse des données CLC permet d'évaluer la consommation des terrains agricoles et naturels sur la période 1990 – 2006. Le calcul d'un pourcentage annuel d'évolution met en évidence la dynamique de l'urbanisation. On constate ainsi un ralentissement du rythme de consommation des terres agricoles ou naturelles entre les périodes 1990-2000 et 2000-2006 (Cf. Illustration 54).

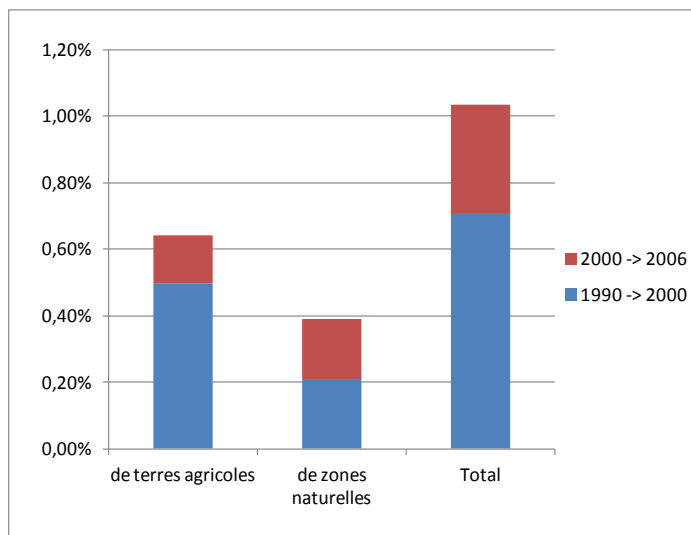


Illustration 54 : Urbanisation de terres agricoles et de zones naturelles (% de la zone d'étude) entre 1990 et 2000, et 2000 et 2006. Données CLC.

L'étude à l'échelle communale montre que l'urbanisation intervient principalement dans les parties centre et sud de la zone (Cf. Illustration 55). Il est vraisemblable que les communes plus éloignées de l'agglomération de Montpellier aient connu également une urbanisation, mais que celle-ci n'apparaît pas en raison de la résolution des données CLC.

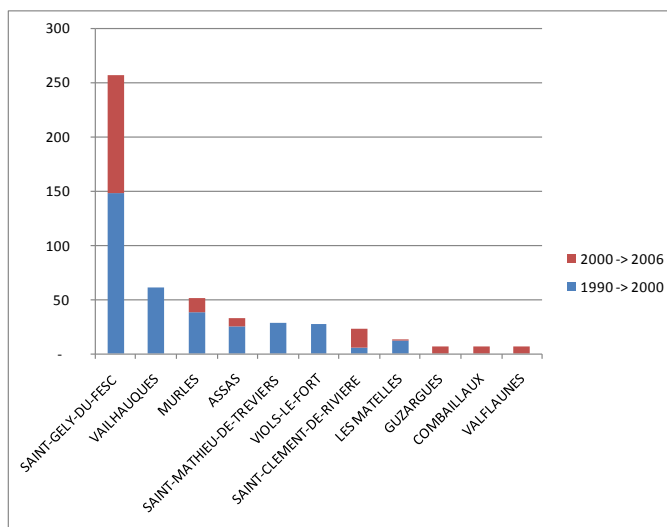


Illustration 55 : Variation des surfaces urbanisées par commune (ha) entre 1990 et 2000 et 2000 et 2006. Données CLC

Indice de risque

De façon schématique, l'occupation du sol peut rendre compte des pressions liées aux activités humaines influençant la qualité des ressources en eau et le fonctionnement des cours d'eau ou des aquifères. Ainsi, bien qu'il ne soit pas possible de passer à des données quantitatives, l'occupation du sol peut être considérée comme représentative d'un *aléa* auquel est soumis l'hydrosystème. L'interprétation de ces données peut compléter utilement des approches déterministes.

Par analogie avec des méthodes éprouvées pour les inondations, le croisement avec la vulnérabilité intrinsèque issue de la méthode PaPRIKa, qui représente l'*exposition à l'aléa*, permet de calculer un indice **relatif** – ou indicateur – de risque.

L'hypothèse d'aléa retenue repose de façon empirique sur une hiérarchisation de l'occupation du sol en trois classes d'aléa croissant :

- aléa faible : zone naturelle (valeur 1) ;
- aléa modéré : zone agricole (valeur 2) ;
- aléa fort : zone urbanisée et routes (valeur 3).

Sous cette hypothèse, l'indice relatif de risque est calculé comme le produit :

indice relatif de risque = indice d'aléa x indice de vulnérabilité.

Les valeurs de l'indice d'aléa allant de 1 à 3, et celle de l'indice de vulnérabilité de 0 à 4 (en fait de 1 à 4), les valeurs de l'indice relatif de risque calculé varient de 1 à 12.

Les résultats sont présentés ici sur une carte ayant pour base de l'occupation du sol « DRAAF LR 2009 » (Illustration 56) L'intérêt de cet indicateur est autant sa valeur informationnelle que le questionnement qu'il suscite puisqu'il conduit à définir une hiérarchie dans des processus naturels et humains difficilement mesurables.

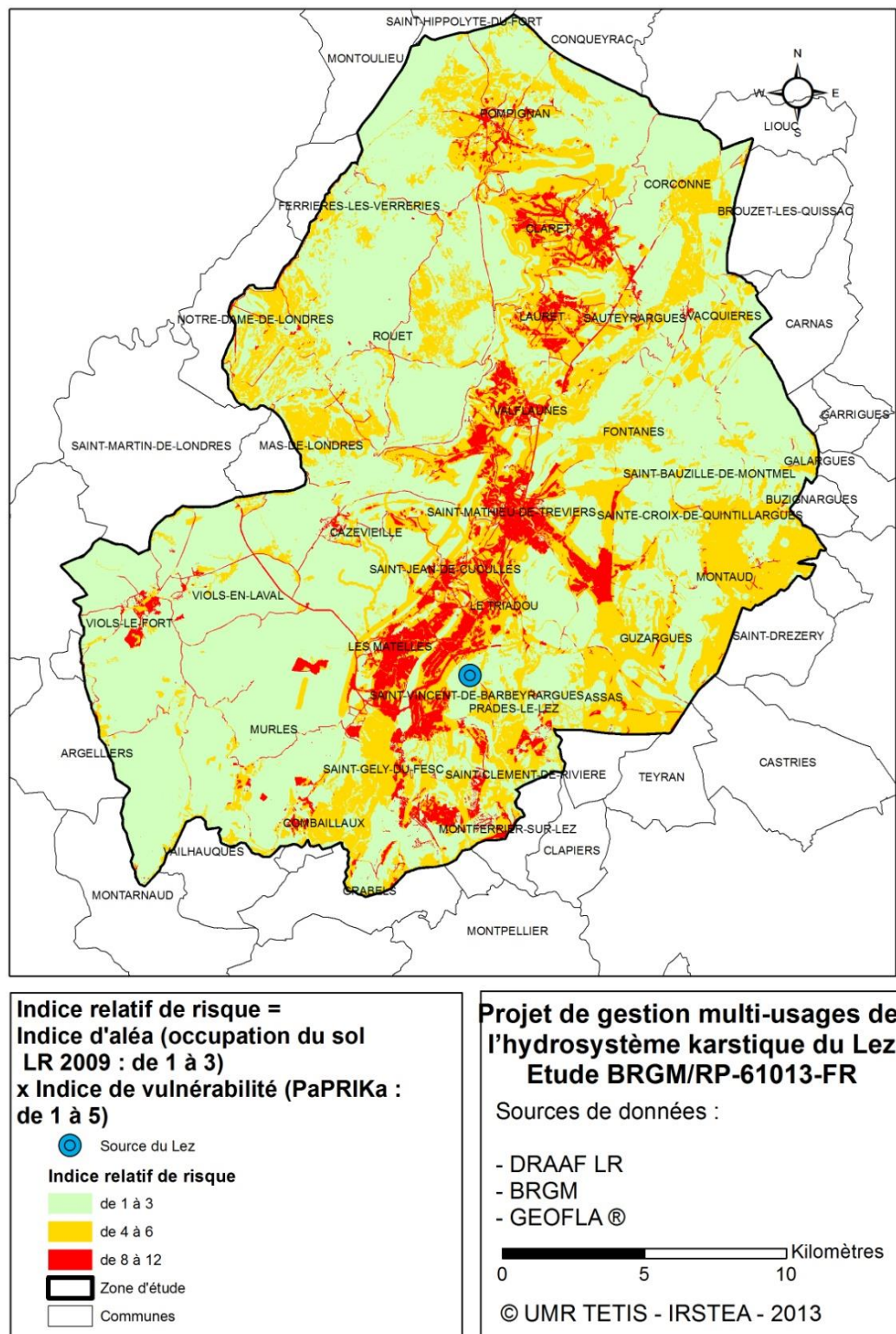


Illustration 56 : Cartographie de l'indice relatif de risque
(Occupation du sol DRAAF LR 2009)

Il peut également présenter un intérêt pour la définition des Zones de Sauvegarde.

Stations d'épuration (STEP)

Les données disponibles n'ont pas permis de réaliser un bilan exhaustif du taux de saturation des STEP de la zone d'étude; néanmoins quelques éléments peuvent être dégagés. Avec l'hypothèse de 100% de raccordement de la population concernée, l'analyse montre que 45 % des 70 000 habitants qui vivent dans des communes en tout ou partie situées dans la zone d'étude est raccordé sur des stations d'épuration dont le point de rejet est localisé dans le bassin d'alimentation du Lez.

Sur ces stations il apparaît que, globalement, la capacité nominale cumulée des STEP de la zone est suffisante. Ce résultat peut toutefois cacher des disparités : ainsi les communes ayant des stations d'épuration d'une charge de plus de 1000 équivalent-habitants semblent bien dimensionnées et présentent une marge de sécurité plus ou moins importante. Il conviendrait de faire une analyse prospective concernant le développement de la population sur ces communes pour mieux connaître la future pression sur ces stations d'épuration.

En ce qui concerne les petites unités (moins de 1000 équivalent habitants), la situation est en général inversée. Cette sous-capacité est sans doute à relativiser car elle peut être liée à l'importance de l'assainissement non collectif déployé sur ces communes peu peuplées. Ce constat semble d'ailleurs corroboré par les taux de saturation faibles de ces STEP.

Par ailleurs, la plupart des systèmes épuratoires ont pris en compte la vulnérabilité des sites en intégrant des dispositifs de traitement tertiaire et/ou une adaptation des conditions de rejet, en déclinaison notamment de la mesure du SAGE LMEP 2003 préconisant le « zéro rejet » comme mesure pour préserver la source du Lez.

Cette initiative devrait être poursuivie et renforcée pour les STEP localisées en zones de vulnérabilité globale très élevée et élevée, où il convient d'examiner avec vigilance, voire de réexaminer, les Schémas directeurs d'assainissement dans leurs différentes composantes, notamment : la capacité des installations, le type de traitement, la qualité des rejets attendue, et le zonage de l'assainissement non collectif. Cette attention paraît d'autant plus justifiée que l'on se situe dans la perspective de la poursuite de l'accroissement de la population.

Enfin, la modification des traitements, notamment par l'ajout de traitements tertiaires permettant de limiter les contaminations, pourrait être renforcée pour les STEP situées sur les zones où la vulnérabilité est la plus élevée (zones de pertes) à l'occasion de tous projets de d'extension ou de réhabilitation.

Recommandation :

Dans le cadre de la préservation de la ressource, il est intéressant de mettre en place un observatoire de l'évolution de l'occupation des sols et de l'urbanisation des zones agricoles et naturelles.

Pour les zones de vulnérabilité globale élevée à très élevée, il convient de porter une attention particulière aux schémas directeurs d'assainissement notamment à l'occasion de leur révision ou leur établissement.

Pour les zones de vulnérabilité globale très élevée, lors de projets d'extension ou de réhabilitation d'ouvrages épuratoires, il convient de poursuivre l'ajout de traitement tertiaire.

4.4.5. Zones de sauvegarde

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Rhône-Méditerranée approuvé en 2009 contient une orientation qui vise à « Evaluer, prévenir et maîtriser les risques pour la santé humaine » (**orientation fondamentale 5E**). En particulier, la **disposition 5E-01 du SDAGE** désigne 98 masses d'eau souterraines sur le bassin Rhône-Méditerranée recelant des ressources d'enjeu départemental à régional pour la satisfaction des besoins en eau potable actuels ou futurs. Dans cette disposition, le SDAGE demande aux services de l'Etat et aux collectivités concernées d'identifier et de caractériser au sein de ces masses d'eau les ressources majeures à préserver pour l'alimentation en eau potable.

Il s'agit de **zones de sauvegarde**. Ces entités ont pour objectif de garantir la capacité à répondre aux besoins futurs en mobilisant des outils adaptés sur ces zones pour limiter les pressions en fonction de leur(s) vulnérabilité(s). Selon les situations et les enjeux, ces zones de sauvegarde peuvent être :

- des terrains en surface nécessaires à la recharge en eau actuelle et future de la masse d'eau (comme des aires d'alimentation de captage...) ;
- des terrains en surface permettant l'exploitation (prélèvements) actuelle et future de cette masse d'eau pour l'AEP (périmètres de protection...) ;
- des portions de masse d'eau projetées en surface.

On distingue deux catégories de zones de sauvegarde :

- les ZSE (Zones de Sauvegarde Exploitées), zones identifiées comme étant intéressantes pour l'AEP future et qui sont déjà utilisées pour l'AEP ;
- les ZSNEA (Zones de Sauvegarde Non Exploitées Actuellement), zones identifiées comme étant intéressantes pour l'AEP future mais qui ne sont pas utilisées actuellement pour l'AEP.

Les ZSE et ZSNEA représentent l'ensemble des zones de sauvegarde pour le futur (ZSF).

L'aquifère karstique du Lez, de par sa qualité et la quantité d'eau souterraine exploitée constitue évidemment une ressource en eau pour laquelle il est pertinent de définir une Zone de Sauvegarde Exploitée (ZSE). Une proposition de délimitation est donnée à l'illustration 57, correspondant à l'impluvium de l'aquifère défini précédemment (§ 2.3.3). Elle correspond à une zone de vulnérabilité élevée à très élevée dans laquelle l'eau qui s'infiltre (de façon diffuse sur les calcaires affleurant ou de façon concentrée dans les pertes) contribue à recharger l'aquifère karstique du Lez.

84

Recommandation :

Une grande vigilance doit être apportée à l'évolution de l'urbanisation sur la ZSE compte tenu de l'attractivité globale de ce territoire afin de maintenir la qualité de la ressource en eau. Il convient de maintenir l'occupation naturelle telle qu'existante – par exemple sur les zones de calcaires affleurant (Garrigues de Viols-le-Fort, terrain militaire) - en traduisant cet objectif dans les documents d'urbanisme (SCOT, PLU), le cas échéant garanti par des outils de protection du type PAEN voire des programmes ciblés d'acquisition foncière qui semblent mobilisables à la marge compte tenu de l'importance des superficies à protéger.

Il convient également de veiller à maintenir des pratiques agricoles (viticulture) compatibles avec la préservation de la qualité de l'eau. Un diagnostic territorial des pratiques agricoles réalisé en concertation avec la profession constituerait une première étape dans l'atteinte de cet objectif.

Les intrants phytosanitaires ont aussi pour origine l'entretien des espaces verts publics et privés. Il convient de poursuivre la sensibilisation et la réalisation des plans d'amélioration des pratiques phytosanitaires et horticoles sur l'ensemble des communes du bassin versant hydrogéologique.

Synthèse des recommandations pour la préservation de la qualité :

Dans le cadre d'une modification de la DUP :

- modification du périmètre de protection éloigné ;
- réflexion sur l'instauration de périmètres de protection rapprochée satellites au niveau des bassins versants de perte.

Au niveau des Zones de Sauvegarde Exploitées :

- vigilance sur l'évolution de l'urbanisation et mise en place d'un observatoire ;
- maintien d'une agriculture compatible avec la préservation de la ressource et réalisation d'un diagnostic des pratiques agricoles.

Au niveau des systèmes d'assainissement :

- suivi et analyse du fonctionnement des systèmes d'assainissement à travers un observatoire s'appuyant sur les outils en place ;
- prise en compte de la problématique dans les schémas directeurs d'assainissement pour les zones de vulnérabilité élevées à très élevées ;
- poursuite de la mise en place d'un traitement tertiaire et/ou d'une adaptation des conditions de rejet pour les futurs projets de stations d'épuration en zones de vulnérabilité très élevées, en continuant à préconiser le « zéro rejet ».

5. Crues de l'hydrosystème du Lez

Référence : rapports BRGM/RP-60222-Fr et BRGM/RP-61050-FR

5.1. INTRODUCTION

La région du Lez est caractérisée par la présence d'épisodes pluvieux intenses, de type méditerranéen convectif ou orographique, également appelés épisodes cévenols. Ces derniers se manifestent par des fortes intensités de pluies qui contribuent à générer des pluies efficaces importantes concentrées sur de courtes périodes de quelques heures. En fonction des conditions hydrologiques, ces événements peuvent générer des crues importantes du fleuve Lez comme cela a été le cas la nuit du 23 au 24 septembre 1976, provoquant d'importants dégâts sur la ville et une vingtaine de communes environnantes.

L'objectif de ce chapitre est de pouvoir répondre aux questions suivantes : (i) des scénarios de gestion du système karstique en période de fin d'été permettent-ils de mitiger les crues automnales ? (ii) comment prendre en compte les débordements du karst dans la modélisation du bassin versant amont du Lez ? et finalement (iii) comment améliorer les modèles de prévision des crues du bassin versant du Lez en considérant à la fois le karst et le ruissellement sur les terrains de couverture du karst ?

Afin d'apporter des éléments de réponses à ces questions, nous commencerons par reprendre les résultats obtenus sur la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème karstique du Lez en crue en lien direct avec la mitigation des crues automnales, puis nous exposerons deux méthodes développées dans le cadre de ce projet qui permettent d'améliorer la prévision des crues du Lez de façon opérationnelle, enfin nous terminerons par les résultats obtenus relatifs aux questions de propagation de la crue dans le fleuve Lez à la traversée de Montpellier, avec là aussi la proposition d'un outil d'aide à la gestion des crues du Lez à vocation opérationnelle.

5.2. COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DE L'HYDROSYSTÈME EN CRUE

5.2.1. Rôle de l'aquifère karstique sur deux événements passés

Comme pour d'autres systèmes karstiques du sud de la France (Maréchal et al. 2008b, 2009), les études réalisées dans le cadre de ce projet de recherche, mais aussi les travaux de recherche antérieurs (Roesch et Jourde, 2006 ; Jourde et al. 2007 ; Borrell et al., 2008, Fleury et al. 2009, Coustau et al., 2011, Jourde et al., 2011b) montrent que la réponse de l'hydrosystème du Lez à une pluie dépend directement du degré de remplissage de l'aquifère karstique avant l'averse. En effet, l'analyse de la réponse du Lez aux épisodes de pluie montre une dualité de fonctionnement du système :

- lorsque le karst est saturé, le système se comporte comme un bassin hydrologique classique avec une forte contribution des pluies au ruissellement ;
- lorsque le karst est sous saturé, les pluies contribuent dans un premier temps à la recharge de l'aquifère karstique; c'est seulement lorsque ce dernier est saturé que le ruissellement devient significatif sur le bassin versant.

Pour illustrer la fonction d'écrêtage des crues par l'aquifère karstique, deux épisodes du 09/10/2001 et du 24/08/2002 sont comparés (Illustration 58). Ils sont caractérisés par des hauteurs de pluie journalières significatives et comparables - de l'ordre de 120 mm. Pour ces deux épisodes, les niveaux d'eau dans le karst avant les précipitations étaient différents : le karst était plein pour le premier épisode et fortement déprimé pour le second. Les réponses en termes de débit et de variation piézométrique sont présentées dans le tableau ci-après (Illustration 58). L'épisode d'octobre 2001 (avec un karst initialement saturé) produit une crue d'un débit à Lavalette supérieur à 200 m³/s, alors que l'épisode d'août 2002 ne provoque pas de crue, les précipitations contribuant uniquement à recharger le karst.

Episode	Pluie (mm)	Piézo ini (m)	Piézo fin (m)	Q source (m ³ /s)	Q Lavalette (m ³ /s)	Q Garigliano (m ³ /s)
09/10/2001	environ 120	66	68,5	24	238	314
24/08/2002	environ 130	43	64	0	6	8

Illustration 58: Débits et variations piézométriques en condition de karst saturé et sous saturé consécutifs à un épisode de pluie d'environ 120 - 130 mm

Ce phénomène n'est pas localisé à la seule source du Lez et ne peut être expliqué par son débit uniquement car celui-ci représente moins de 10% du débit mesuré aux exutoires de La Valette ou Garigliano. Il s'agit en fait d'un phénomène régional à l'échelle du bassin hydrogéologique de la source en pompage avec un fort taux de recharge et une faible intensité des débits aux résurgences (ou « bouldous ») lors de la première crue.

Cet impact de l'état de saturation initial de l'aquifère karstique sur les crues éclair a été observé dans d'autres systèmes karstiques méditerranéens ne faisant pas l'objet de pompages tels que la Fontaine de Nîmes par exemple (Maréchal et al. 2008) ou encore le Coulazou (Bailly-Comte et al., 2012).

Les niveaux d'eau dans le karst, lorsqu'il est saturé, atteignent 65 m NGF, l'écoulement se fait alors naturellement à la vasque. Les périodes pendant lesquelles le niveau d'eau à la vasque est supérieur à 65 m NGF nécessitent une vigilance accrue lors des épisodes pluvieux. Par contre en période de sollicitation des réserves par pompage, le niveau peut descendre 25 m sous le niveau de la vasque offrant une capacité de rétention importante. Du fait du mode de gestion active de l'aquifère durant l'été, une partie des précipitations automnales est stockée dans le karst et ne participe pas à la crue. Le karst joue ainsi le rôle d'écrêteur de crue (Roesch et Jourde, 2006). La gestion active contribue à augmenter la capacité de rétention du bassin versant.

5.2.2. Généralisation du rôle de l'aquifère karstique dans la dynamique de la crue de surface du Lez

Le comportement du système (variations piézométriques dans le karst, débit dans le fleuve et à la source) a été étudié au cours des principaux épisodes de précipitations (cumul épisode supérieur à 50 mm) sur la période 2000-2010. Cette étude a permis de mettre en évidence trois situations distinctes (Illustration 59):

- situation (a) : le karst est initialement sous-saturé (niveau proche de 35 mNGF), les précipitations contribuent à sa recharge, les débits à la source et dans le fleuve sont faibles. Ce type d'épisode se produit à la fin des périodes estivales ;
- situation (b) : le karst sous saturé initialement se remplit dans un premier temps, il atteint sa cote de saturation (65 m NGF) au cours de l'épisode pluvieux. Les pluies se poursuivent ensuite et entraînent une augmentation des débits à la source et dans le fleuve ;
- situation (c) : le karst est déjà saturé en début d'épisode (cote proche ou supérieure à 65 m NGF), les précipitations sont responsables d'une crue sur le Lez .

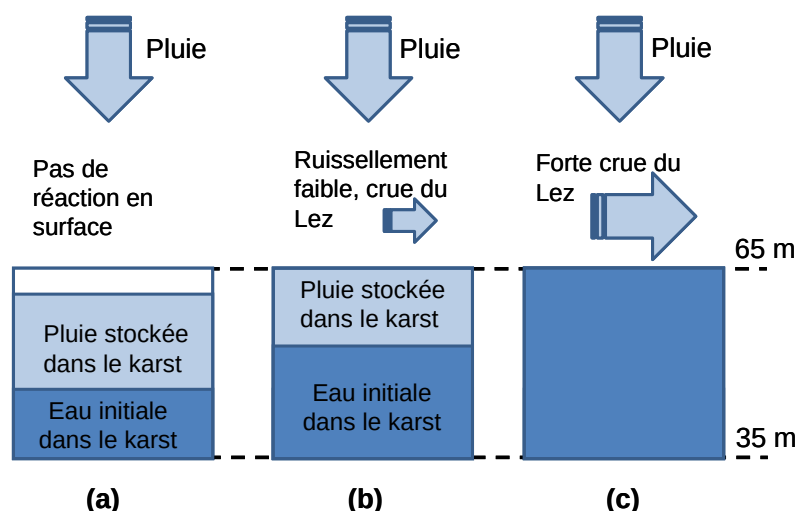


Illustration 59 : schéma de fonctionnement hydrologique lors d'une pluie selon le remplissage initial du karst : (a) karst très peu rempli, (b) karst faiblement rempli, (c) karst plein

L'analyse des chroniques associées aux différentes situations a ainsi permis de caractériser un modèle conceptuel de fonctionnement pour chacune de ces situations.

L'analyse de près de dix épisodes montre qu'en situation (a), il faut en moyenne 5 mm de précipitations sur l'impluvium de la source du Lez pour assurer la remontée d'un mètre au sein de l'aquifère karstique, soit 50 mm de précipitation pour une remontée de 10 m du niveau piézométrique. Ainsi, lorsque le karst est à son niveau minimum statistiquement observé actuellement (40 m NGF, soit - 25 m sous le niveau de la vasque), il possède une capacité d'écrtage correspondant à environ 125 mm de pluie si celle-ci se déroule sur l'impluvium de la source du Lez.

5.3. OUTILS D'AIDE A LA DECISION POUR LES PREVISIONNISTES EN AMONT DE MONTPELLIER

5.3.1. Introduction

L'objectif a été de développer des outils d'aide à la prévision des crues formées en amont de Montpellier sur l'hydrosystème karstique du Lez par des précipitations intenses à extrêmes.

Le premier développement réalisé consiste en la mise en place d'un modèle hydrologique de type Pluie-Débit qui simule la réponse en crue du bassin du Lez. Afin

d'assurer son utilisation en temps réel, le modèle a été développé sur la plateforme ATHYS déjà utilisée par le SCHAPI. Les résultats de recherche ont mis en évidence que la répartition spatiale de la pluie était un facteur conditionnant la réponse hydrologique. Aussi, afin de prendre au mieux en compte cette information, il a été proposé une utilisation en temps réel des images issues du radar météorologique préalablement traitées par CALAMAR. Cette utilisation passe par une correction qui a été réalisée par assimilation de données. Le modèle et la correction par assimilation de données ont par la suite été programmés dans la version opérationnelle d'ATHYS, les rendant directement opérationnels.

Le second développement proposé est un abaque, soit un outil simple et rapide d'utilisation. Il relie pluie, niveau de remplissage initial du karst et débit à Lavalette. Il est constitué de deux graphes qui s'utilisent conjointement : le premier permet d'appréhender en fonction du niveau dans le karst la part des précipitations écrêtées; le second, utilisé une fois le karst rempli, permet d'évaluer le débit du Lez à Lavalette en fonction de la lame d'eau précipitée et de son intensité après saturation du karst.

5.3.2. Modèle opérationnel des crues du Lez

Le modèle hydrologique

Le modèle hydrologique de simulation des crues de surface du Lez à la station de Lavalette utilisé ici a été développé dans le cadre de cette étude et de la thèse de M. Coustau (2011). Il est décrit dans le rapport L4-1 du projet Lez – GMU (Rapport BRGM/RP-60222-FR, Borrell-Estupina et al. 2012). En plus de son architecture et de son fonctionnement, son calage et une analyse de sensibilité y ont été décrits.

Compte tenu de l'objectif visé (la prévision des crues importantes pour des temps de réponse inférieurs à 6 heures)⁶ et des fortes variabilités spatio-temporelles des pluies méditerranéennes, ce modèle est de type pluie-débit, à réservoir, événementiel, distribué, parcimonieux et fonctionne à pas de temps horaire.

Le rapport L4-1 a montré que ce modèle fournit des simulations de crue satisfaisantes avec des pics de crue relativement bien reproduits. L'erreur moyenne sur le débit maximum est inférieure à 20 %, ce qui est un résultat acceptable au vu de l'incertitude sur les données de précipitations.

Nous venons de voir comment, suite à une pluie incidente, l'état initial de remplissage du sol et du karst évoluait vers un nouvel état. Cela se traduit dans le modèle par une initialisation de l'état hydrique initial du souterrain. Karst et sol sont conceptualisés par un unique réservoir dans le modèle (réservoir de production S). La condition initiale du modèle est un paramètre qui voit sa valeur modifiée entre chaque crue. La valeur doit être fixée en début d'épisode pluvieux.

De manière générale, le modèle simule correctement 18 des 21 épisodes de crue avec un Nash allant de 0,66 à 0,94 et un jeu de paramètres constant pour tous les épisodes excepté la taille du réservoir de production S. De plus, S présente de fortes valeurs pour les épisodes de début d'automne survenant après une longue période de sécheresse et de faibles valeurs pour les autres épisodes survenant après les premières pluies de l'automne. Comme attendu, la valeur de S, représentant le déficit

⁶ A noter que le modèle n'a pas vocation à reproduire la réponse du bassin à des précipitations de faibles intensité et cumul.

hydrique initial, dépend de la saison et des pluies antécédentes (qui déterminent l'état hydrique du bassin en début d'épisode). Le modèle paraît donc bien refléter la saisonnalité constatée lors de l'analyse des données.

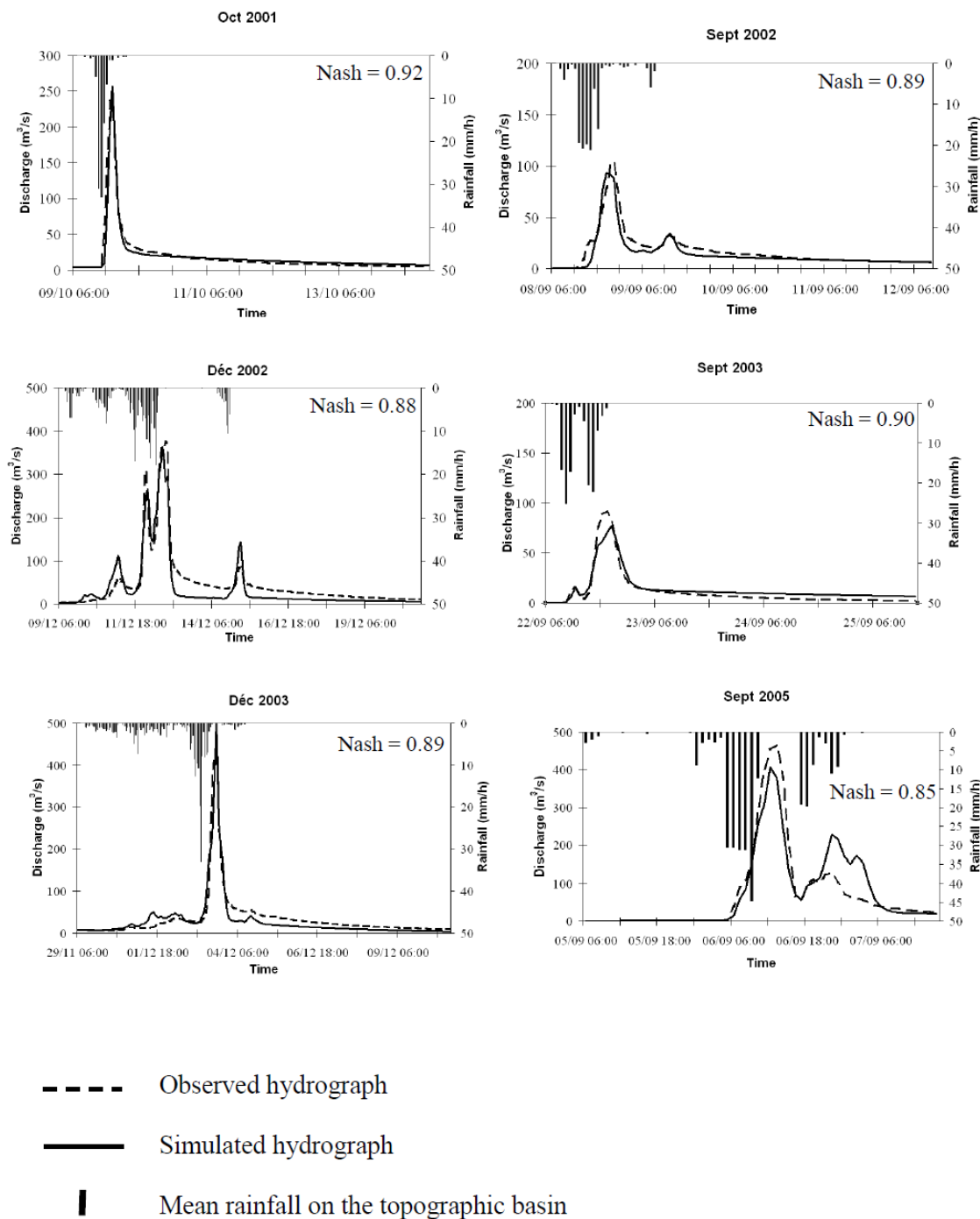


Illustration 60 : Hydrogrammes simulés et observés à Lavalette pour les 6 événements majeurs de la base de données, les critères de qualité de la simulation y sont précisés (Nash)

Afin de rendre ce modèle utilisable en temps réel, la méthodologie proposée ici a été de caler, a posteriori, la valeur de cette condition initiale sur toute la gamme d'événements étudiés, puis de comparer cette valeur à celle de différents indicateurs de l'état hydrique initial du bassin (débit de base, débit de source, niveau piézométrique en différents points de l'aquifère, humidité du sol mesurée in situ - dans

le cadre de ce projet - ou bien simulée par le modèle SIM de Météo France...). Ces résultats d'étude sont détaillés dans (Coustau et al., 2012a). Une fois cette comparaison effectuée, il a été possible de relier la valeur de la condition initiale du modèle à différents indicateurs hydrogéologiques. L'intérêt est que les valeurs des indicateurs sont connues avant le démarrage de l'épisode de pluie. Ceci permet au prévisionniste d'utiliser le modèle en temps réel. Tous les indicateurs n'ont pas la même efficacité. Il est recommandé d'utiliser soit l'humidité simulée SIM, soit la piézométrie à Claret en complément de la piézométrie à la source qui ne fournit plus d'information pertinente au-delà de 65m (niveau du seuil de la vasque).

L'intégration en temps réel des lames d'eau radar

Comme stipulé précédemment, les résultats de recherche mettent classiquement en évidence que la répartition spatiale de la pluie était un facteur conditionnant la réponse hydrologique du bassin. Il est donc apparu pertinent de comparer les performances du modèle hydrologique qui utilise les données de pluies issues du réseau au sol de postes pluviométriques avec celles obtenues en utilisant les images radar (Coustau et al., 2011). Il a été montré que la prise en compte de la répartition spatiale de la pluie était un facteur d'amélioration de la simulation. Toutefois, cela passe par la correction des images radar. Cette correction reposant sur les données de cumul de pluie de l'événement à simuler, il est impossible de travailler en mode opérationnel avec cette image radar.

Aussi, afin de prendre au mieux en compte cette information, il a été proposé une utilisation en temps réel des images issues du radar météorologique préalablement traitées par CALAMAR. L'image, telle que disponible dans les SPC, est alors directement intégrée en entrée du modèle Pluie-Débit, permettant une simulation du débit. Toutefois, la traduction des images en lame d'eau, même après traitement CALAMAR, reste trop imprécise et ne permet généralement pas une utilisation en temps réel. Nous avons donc proposé (collaboration HSM - CERFACS) une correction par assimilation de données (Harader et al., 2012). Cette approche est tout particulièrement novatrice.

Conclusion

La modélisation hydrologique proposée ici s'intéresse exclusivement aux réponses de l'hydrosystème du Lez face à des sollicitations pluvieuses fortes à extrêmes. L'état initial de remplissage du karst, l'humidité initiale des sols tout comme la distribution spatiale et temporelle de la pluie au cours de l'événement sont des connaissances capitales à une correcte anticipation et compréhension de la crue de surface.

Dans cette optique, les données d'humidité SIM (produit Météo France) ou le suivi du niveau d'eau au piézomètre de Claret (à défaut, à la source du Lez) doivent être inclus dans la chaîne de prévision. La qualité du débit simulé résulte directement de la qualité de l'initialisation de l'état hydrique de l'hydrosystème.

Il convient aussi d'intégrer la spatialisation de la lame d'eau précipitée. La meilleure façon de procéder est de prendre en compte les images du radar météorologique en entrée du modèle. Toutefois, une telle utilisation des images (très peu répandue aujourd'hui) passe par une correction temps réel des images. La boucle d'assimilation de données implémentée autour du modèle hydrologique permet cela.

Qu'il s'agisse du modèle en lui-même, ou bien de la boucle d'assimilation de données, les outils développés en lien avec ce projet ont été implémentés de façon générique dans la chaîne numérique de modélisation du SCHAPI.

Recommandation :

A l'avenir, il conviendrait de tester la validité du modèle sur un plus grand échantillon d'événements de crue, afin de bien valider la procédure et les valeurs des paramètres retenus. En effet, même si le modèle apparaît comme robuste dans les tests réalisés, le rallongement des bases de données pour le calage et la validation du modèle permettra de préciser les incertitudes sur les débits simulés. De plus, une procédure de calage-validation sur une plus longue période, permettra de confronter le modèle à la non stationnarité climatique et d'assurer ainsi un meilleur comportement face au changement climatique dans le cadre d'une utilisation à plus long terme.

Parmi les autres perspectives d'amélioration, il est possible d'allonger les délais d'anticipation de la crue en temps réel en utilisant les nouveaux produits de pluie future fournis par Météo France à divers horizons de prévision. Cela nécessitera la propagation de l'incertitude des scénarios pluvieux en temps réel. Là encore, l'assimilation de données pourrait être une solution pour corriger en temps réel ces prévisions et optimiser l'information hydrologique simulée.

Enfin, il serait pertinent de réaliser un retour d'expérience sur l'utilisation de cet outil auprès des prévisionnistes.

5.3.3. Abaque de vigilance opérationnel des crues du Lez

Afin de proposer un abaque de vigilance des crues de surface en amont de la ville de Montpellier, il a été nécessaire de :

- i) analyser, puis de quantifier le rôle de l'état initial de remplissage de l'aquifère karstique, celui des autres états initiaux du bassin (antécédent pluvieux, humidité des sols, débit de base...) ainsi que celui des caractéristiques de l'averse (cumul, durée, intensité) dans la genèse des crues historiques de surface ;
- ii) conceptualiser la relation "pluie - état initial - remplissage du sol et du karst" à travers un schéma de fonctionnement simplifié et de la typologie des crues pré-établies ;
- iii) modéliser le fonctionnement de l'hydrosystème sous différents scénarios de forçage pluvieux et de remplissage du karst ;
- iv) de synthétiser la relation obtenue entre "pluie - karst - crue" sous la forme d'un abaque de vigilance des crues.

Relation pluie - état initial - niveau dans le karst

La capacité d'absorption maximale du sol a été fixée à 20 mm (taille de la RFU_{max}), la capacité minimale pour un sol humide en début d'événement ayant été fixée à 0 mm. Le cumul de pluie de l'évènement à étudier doit donc, avant toute chose, être amputé de cette valeur maximale de 20 mm si le sol n'est pas saturé.

La recharge du karst par les précipitations a été précédemment estimée à 1 m de remontée du niveau piézométrique pour 5 mm de pluie. Un premier abaque est ainsi défini à partir de cette loi (Illustration 61). Il permet d'approcher en fonction du niveau initial et du cumul de pluie le niveau final de remplissage du karst.

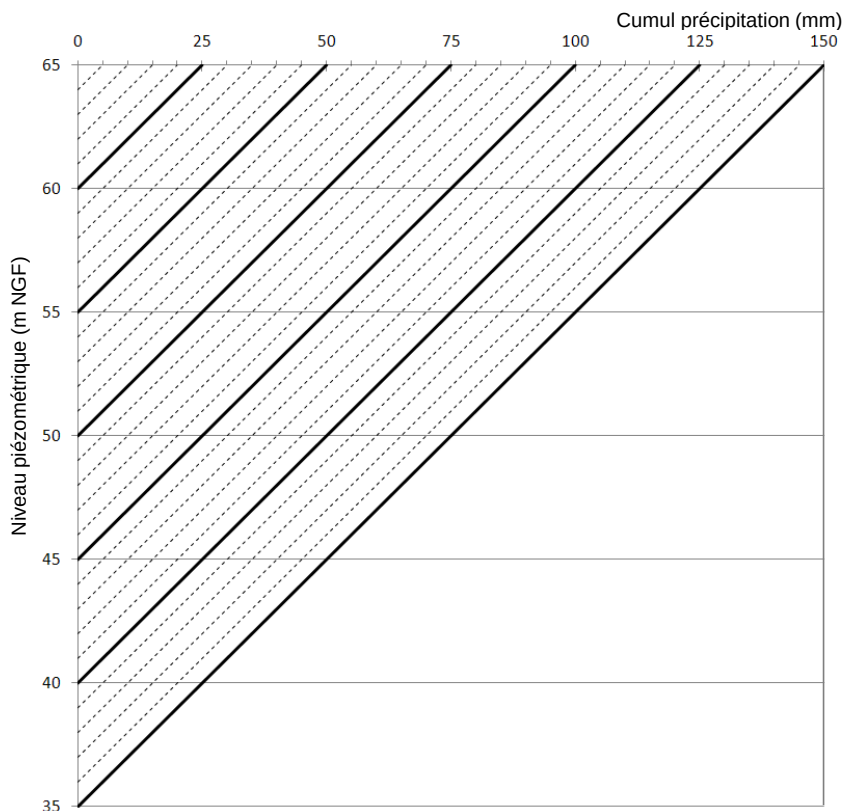


Illustration 61 : Abaque n° 1 - Pluie / niveau du karst

Conceptualisation de la relation "pluie - débit"

Le modèle hydrologique de simulation des crues de surface du Lez à la station de Lavalette (décrit au § 5.3.2) a été utilisé avec une condition initiale S (déficit hydrique du sol) = 0 puisque la saturation de l'hydrosystème est par ailleurs prise en compte par l'abaque n°1.

Il a été décidé d'élaborer un outil de vigilance allant jusqu'à des intensités de 50 mm/h pendant au maximum 6 heures. Pour cela, et du fait des fortes variabilités spatio-temporelles des pluies méditerranéennes, des scénarios de pluies plausibles ont été construits et imposés en entrée du modèle hydrologique. La gamme des intensités couverte varie de 5 à 50 mm/h par pas de 5 mm/h, sur des durées allant de 1 à 6 heures, et par pas de 1 h puis de 12, 18 et 24 h. A partir de ces résultats, trois courbes de débit en fonction des précipitations selon différentes intensités sont construites (Illustration 56). La courbe d'intensité 10 mm/h (courbe en vert pointillé sur l'abaque final) fournit la limite avec les épisodes de faible intensité. La courbe d'intensité 15 mm/h (en pointillés orange) permet d'approcher les épisodes d'intensité significative mais non extrême. Enfin, la courbe d'intensité égale à 50 mm/h (pointillés rouges) permet d'approcher les épisodes extrêmes.

La grille de Vigilance à Garigliano utilisée par le SPC en niveaux d'eau atteints dans le Lez peut être traduite en débits à la station limnimétrique de Lavalette de la façon suivante :

- Vigilance jaune : $H_{\text{Garigliano}} = 1,75 \text{ m}$; $Q_{\text{Garigliano}} \approx 75 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{Lavalette}} \approx 70 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Vigilance orange : $H_{\text{Garigliano}} = 3,25 \text{ m}$; $Q_{\text{Garigliano}} \approx 400 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{Lavalette}} \approx 350 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Vigilance rouge : $H_{\text{Garigliano}} = 4,25 \text{ m}$; $Q_{\text{Garigliano}} \approx 600 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{Lavalette}} \approx 500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ces trois niveaux, vigilance jaune, orange, rouge, sont indiqués dans l'outil qui sera utilisé pour la vigilance du tronçon. Ils correspondent à la symbologie utilisée par le SCHAPI pour ses cartes de vigilance « crue ».

Les épisodes étudiés sont replacés dans l'abaque (Illustration 62). On vérifie que les épisodes en rouge et orange sont au-dessus de la courbe pointillée orange, proche de la courbe rouge. De la même façon, les épisodes de faible intensité en vert sont en dessous de la courbe de faible intensité. Les épisodes intermédiaires en jaune évoluent entre les courbes verte et orange. Globalement les limites proposées sont cohérentes avec les épisodes observés, validant ainsi ces dernières.

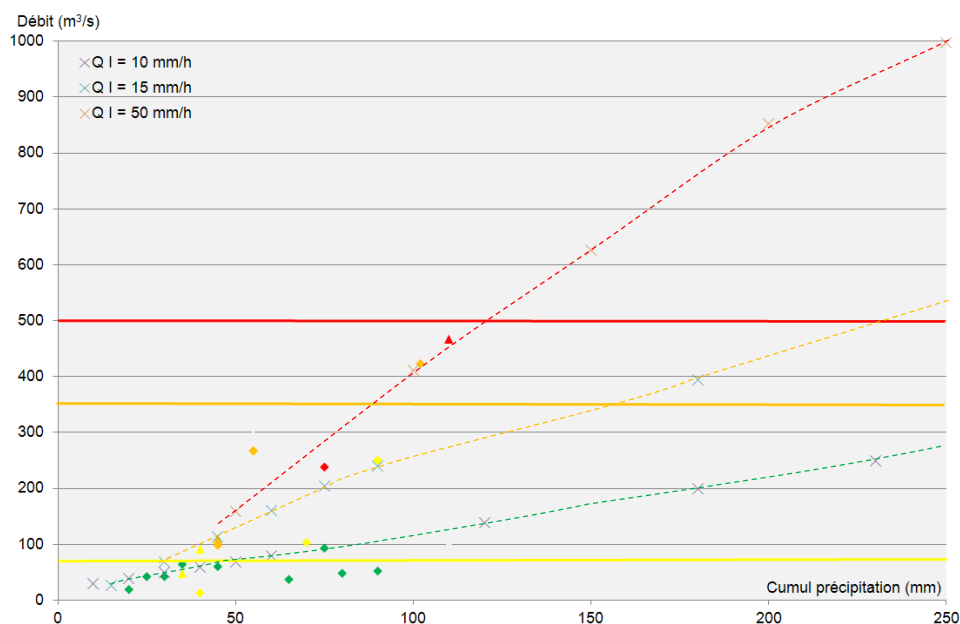


Illustration 62 : Abaque n° 2 - Débit du pic de crue horaire à Lavalette / cumul des précipitations efficaces. Les courbes relient les résultats de simulations d'épisodes d'intensités similaires (figurés par des croix). Les losanges et triangles représentent des événements réels.

Rappelons que cet outil de prévision a été développé pour le système karstique du Lez et que l'abaque ne peut être utilisé que pour des pluies situées sur l'impluvium de cet aquifère (cf 2.3.3).

Utilisation des abaques

Pour une utilisation simple, les deux abaques ont été conçus pour être utilisés conjointement : en partie inférieure celui correspondant au karst et dans la partie supérieure celui affecté au ruissellement. L'abaque est constitué des deux parties pouvant coulisser l'une par rapport à l'autre afin de pouvoir être utilisé pour l'ensemble des états de saturation du karst.

L'abaque a été testé sur l'épisode de septembre 2005. Précédé d'environ 20 mm de pluie (10 jours précédents), le sol est ainsi considéré comme saturé et les premières précipitations ne sont pas écrêtées. Les premières précipitations (cumul de 95 mm) permettent de saturer le karst. Le niveau passe ainsi de 46 m NGF (point A sur l'abaque, Illustration 63) à 65 m NGF (point B). Les précipitations sur le système sont ensuite de 110 mm en 3 h. Compte tenu de l'intensité moyenne horaire de 37 mm l'épisode est considéré comme extrême. Le point C est obtenu pour un cumul de 110

mm et une intensité extrême. Le système passe en vigilance orange et est proche de la vigilance rouge. Le débit associé ainsi défini à partir de l'abaque est égal à 460 m³/s, ce qui est très proche du débit mesuré (467 m³/s).

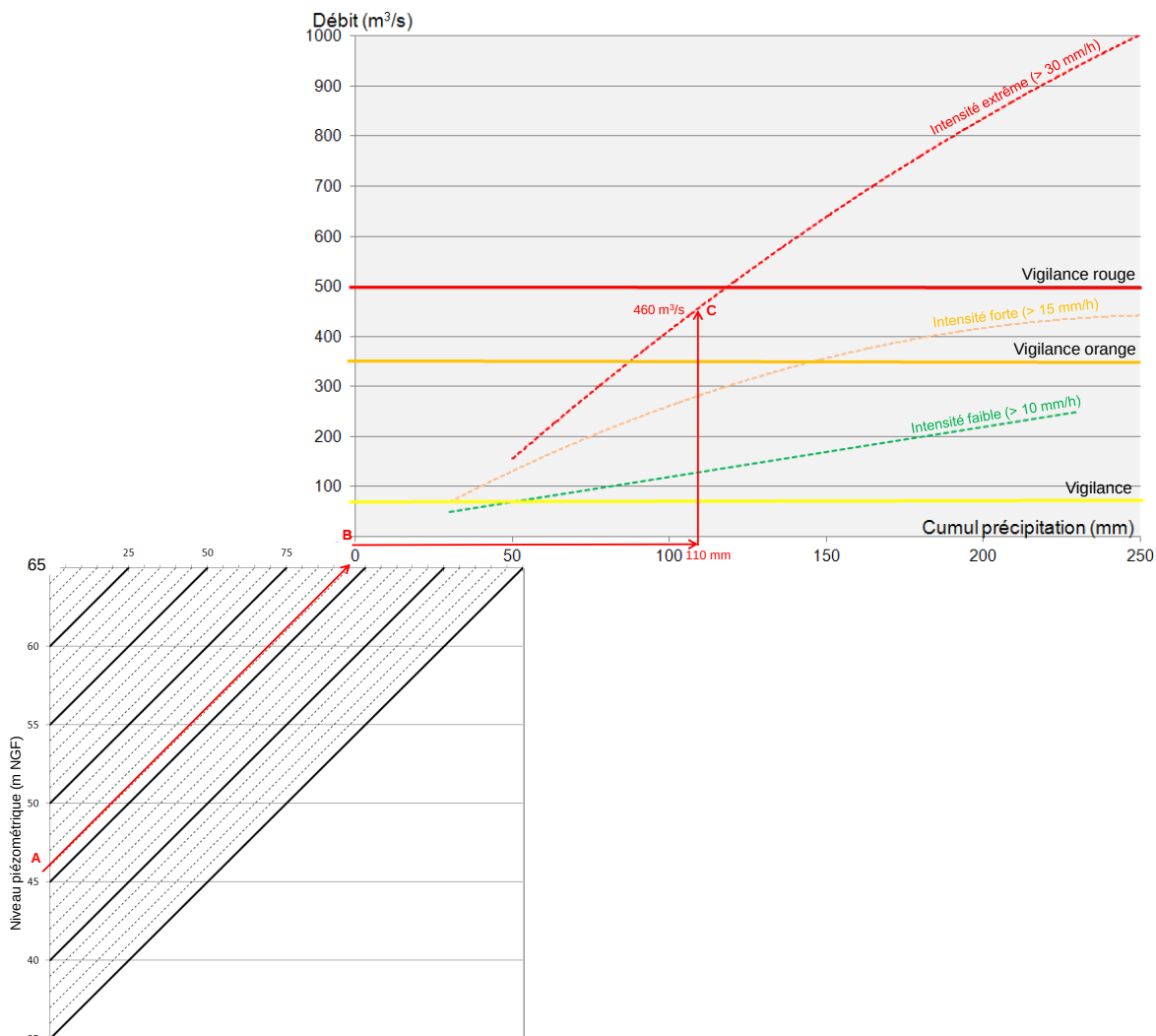


Illustration 63 : Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de septembre 2005 sur un karst sous saturé.

5.3.4. Conclusion

L'étude du système karstique a montré le rôle positif joué par la gestion active de l'aquifère karstique sur l'amplitude des premières crues d'automne. La capacité de stockage de l'aquifère karstique en période de crue est estimée à 5 mm de pluie par mètre de rabattement. Cela signifie que pour un niveau d'eau dans le karst proche du niveau actuellement permis par la DUP (35 m NGF), la capacité de rétention de l'aquifère karstique est potentiellement de l'ordre de 150 mm de pluie si celle-ci est localisée sur l'impluvium de la source du Lez. L'hypothèse d'une DUP permettant un rabattement plus important permettrait probablement d'augmenter cette capacité de rétention.

Recommandation :

Il est recommandé, pour améliorer la prévision des crues sur le bassin du Lez, de prendre en compte l'état de saturation initial du karst au travers de son niveau piézométrique mesuré à la source du Lez. Dans cette perspective, un double-abaque (à triple entrée : cumul pluie, intensité pluie et niveau piézométrique) a été développé dans le cadre de cette étude. Transmis au Service de Prévision des Crues Méditerranée-Ouest dans le cadre d'une collaboration avec le Schapi, il est opérationnel depuis 2011. Pour améliorer l'alerte, il est recommandé de mettre en place une télétransmission des données piézométriques de la source du Lez vers le SPC pour assurer une prise de décision efficace et rapide.

Cette anticipation du débit est toutefois limitée au point de Lavalette, en amont de Montpellier. Propager cette information sur l'aval suppose d'une part la prise en compte de l'influence de la topographie du fleuve, des aménagements et des influences aval ou anthropiques (objet du chapitre suivant), et d'autre part que des abaques pluie-débit soient réalisés sur les affluents avals du Lez. Cela passe préalablement et nécessairement par une instrumentation hydrométrique et météorologique, ainsi que par un suivi des sous bassins versants concernés.

De plus, les effets de la répartition spatio-temporelle de la pluie ne peuvent être pris en compte sur cet abaque défini en global pour l'ensemble de l'impluvium de l'aquifère du Lez, générant ainsi de l'incertitude sur la prévision. Une utilisation simultanée des abaques et du modèle s'avère nécessaire.

5.4. OUTILS D'AIDE A LA DECISION POUR LES PREVISIONNISTES - A LA TRAVERSE DE MONTPELLIER

5.4.1. Introduction

La modélisation hydraulique du Lez, réalisée avec le logiciel SIC (Irstea Montpellier), a permis de mieux comprendre la dynamique de la propagation des crues de la station de Lavalette à la 3^{ème} écluse de Latte (Illustration 64). Les principaux résultats sont exposés ci-dessous.

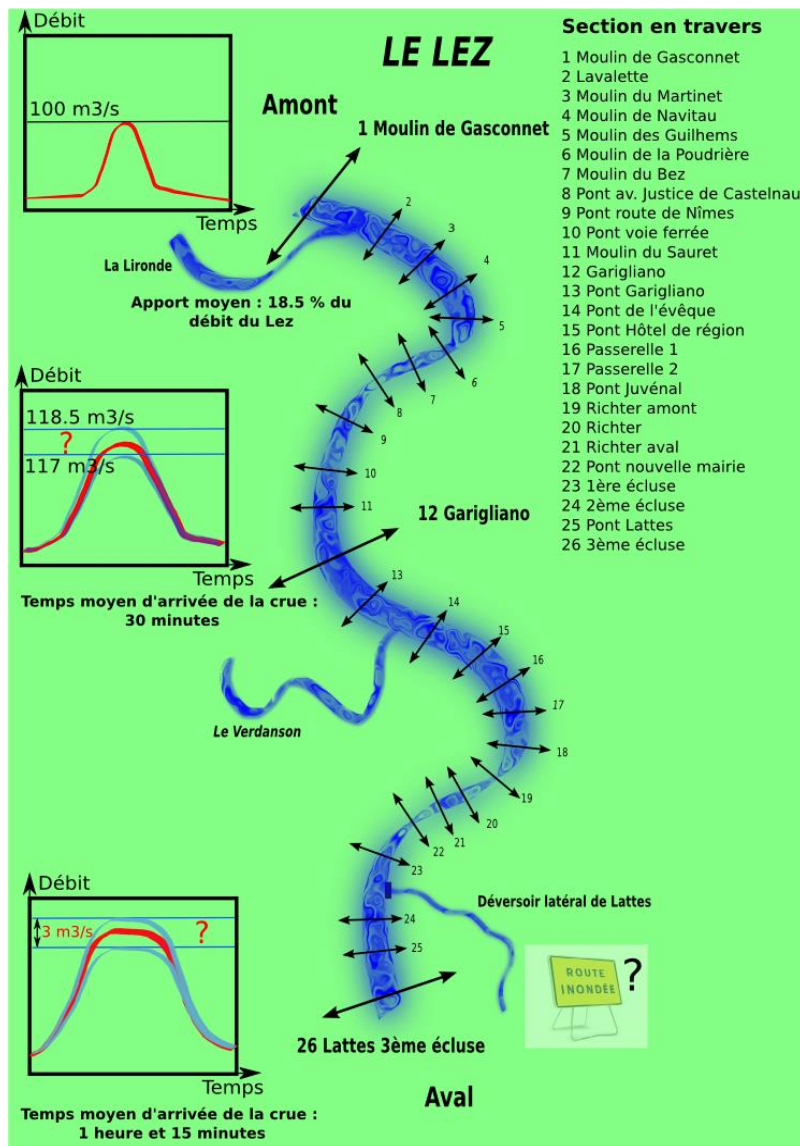


Illustration 64 : Zone du Lez modélisée sous SIC

5.4.2. Influence du lit majeur

Les simulations hydrauliques des crues du Lez ont permis de quantifier l'influence du lit majeur situé autour de la station de Lavalette. Ces simulations ont montré que le volume d'eau écrêté par ce lit majeur est négligeable par rapport au volume de chaque crue. Par exemple, pour une crue d'ampleur de celle du 09/10/2001 (292 m³/s estimé à la station de Lavalette), le volume stocké dans le lit majeur est d'environ 13 427 m³ ce qui représente 0,15 % du volume total de la crue. Sur les 12 épisodes étudiés, ce volume ne dépasse jamais 0,2 % du volume des crues. Cette étude n'a pas été réalisée pour les zones encore plus à l'amont, c'est-à-dire entre la source du Lez et Lavalette ainsi que sur les affluents amont (Lirou, Terrieu, Lironde). Mais, sans sous-estimer les risques de dommages potentiels aux constructions en zone inondable, l'examen de la topographie de ces zones et les calculs réalisés pour la zone vers Lavalette indiquent que l'écrêtage des crues par ce lit majeur reste négligeable.

5.4.3. Impact du laminage des crues

Lorsqu'une crue se propage dans le Lez, celle-ci a tendance à s'étaler à cause des phénomènes de diffusion, liés en grande partie aux pertes d'énergie par frottement le long des biefs. Cet effet, appelé laminage, est plus ou moins important en fonction de la forme initiale de l'hydrogramme et du débit de pointe. Le modèle a permis de tester la sensibilité des crues propagées dans le Lez à cet effet. L'impact moyen du laminage des crues sur le débit de pointe et la cote maximale de l'eau est présenté pour différents intervalles de débit à l'illustration 65 en distinguant la partie du Lez située à l'amont de celle située à l'aval du barrage du Moulin de l'Evêque.

Gamme de débit	Variables affectées	Partie amont	Partie aval
Débit $\leq 100 \text{ m}^3/\text{s}$	Débit (m^3/s)	0,66 m^3/s	1,2 m^3/s
	Cote de l'eau (cm)	0,6 cm	1,3 cm
100 m^3/s < Débit $\leq 200 \text{ m}^3/\text{s}$	Débit (m^3/s)	1,7 m^3/s	3,1 m^3/s
	Cote de l'eau (cm)	1,86 cm	2,14 cm
200 m^3/s < Débit $\leq 300 \text{ m}^3/\text{s}$	Débit (m^3/s)	2,8 m^3/s	5 m^3/s
	Cote de l'eau (cm)	2,85 cm	2,85 cm
300 m^3/s < Débit $\leq 400 \text{ m}^3/\text{s}$	Débit (m^3/s)	5,94 m^3/s	9,3 m^3/s
	Cote de l'eau (cm)	4,92 cm	5 cm
Q > 400 m^3/s	Débit (m^3/s)	13 m^3/s	26,4 m^3/s
	Cote de l'eau (cm)	8,8 cm	9,3 cm

Illustration 65 : Impact moyen du laminage sur le débit et la cote de l'eau pour 5 gammes de débit. Le barrage du Moulin de l'Evêque sépare la partie amont de la partie aval.

En moyenne, l'impact du laminage des crues est relativement faible. Il est cependant légèrement plus important pour la partie aval du Lez. Les valeurs présentées ici sont des moyennes. Il peut donc arriver que le laminage affecte d'une vingtaine de centimètres la cote de l'eau pour les forts débits.

5.4.4. Effet de l'aval lors des régimes transitoires

Lorsqu'une crue se propage sur le Lez, son effet hydraulique plus à l'aval (débit et cote maximum en certaines sections par exemple) dépend de la forme et de l'amplitude de la crue générée à l'amont (provenant du bassin versant amont), mais également du niveau aval du Lez. Ce niveau aval peut être influencé par des phénomènes externes (marée, vent du Sud, autres affluents aval), mais aussi par la crue elle-même. En effet, lorsque la crue se propage vers l'aval, le niveau aval augmente, ce qui contrarie l'évacuation de cette crue. C'est pour cette raison que pour un même débit maximum à l'amont, une crue lente (qui dure longtemps) aura des effets hydrauliques plus importants à l'aval (cotes d'eau plus hautes) qu'une crue plus rapide. On appelle cela l'effet de la condition aval. Les simulations transitoires des crues du Lez ont montré

que cet effet de la condition limite aval est négligeable devant l'effet du laminage. L'ennoiement plus important des biefs aval n'impacte donc pas significativement la ligne d'eau lors de l'arrivée d'une crue. Pour un débit donné, localement à une section du Lez, la cote maximum obtenue est très proche (1cm près), de la cote obtenue avec un calcul en régime permanent pour ce même débit.

5.4.5. Temps de propagation des crues dans le Lez

Les simulations ont permis d'évaluer le temps de propagation des crues le long du Lez. Ce temps varie selon l'intensité et la forme de la crue. Depuis le seuil du moulin de Gasconnet (amont), le pic de crue met en moyenne 30 minutes pour atteindre la station de Garigliano et 75 minutes pour atteindre la 3^{ème} écluse. Pour les plus forts débits ($>400 \text{ m}^3/\text{s}$), ce temps est augmenté d'environ 15 minutes. La propagation d'une crue observée à Lavalette vers la partie aval du Lez est donc rapide et laisse peu de temps pour réagir.

5.4.6. Les affluents de la Lironde et du Verdanson

La reconstitution des apports latéraux entre Lavalette et Garigliano pour les 12 crues étudiées a montré qu'ils représentent en moyenne 18,5 % du volume de la crue provenant du bassin versant du Lez (mesuré à la station de Lavalette). Cet apport semblerait atteindre plus de 57 % du volume mesuré à Lavalette lors de la crue du 22/09/2003. Sur cette zone, le principal affluent est la Lironde. Sa part dans cet apport est donc probablement très importante. Il n'est néanmoins pas possible de vérifier les résultats car aucune observation n'existe sur la partie aval de cet affluent.

L'affluent du Verdanson n'a pas pu être étudié en détail car il n'est pas non plus instrumenté directement. La station hydrométrique située à l'aval de cet affluent (à la 3^{ème} écluse) n'a été installée qu'en 2008, et nous ne disposons que d'une seule crue observée après cette date. Par ailleurs, la courbe de tarage de cette station hydrométrique n'est pas encore suffisamment fiable pour permettre une analyse précise.

5.4.7. Abaques débit - cote

Afin d'exploiter facilement les résultats du modèle hydraulique, des abaques ont été calculés en faisant tourner ce modèle sur un ensemble de crues représentatives, comprenant au minimum les 12 crues les plus importantes depuis 1998. Chaque abaque (cf. exemple de celle à l'Hôtel de Région, Illustration 66) permet d'indiquer la cote maximale atteinte pour l'endroit sélectionné (ex. : Hôtel de Région), en fonction du débit de pointe à l'amont, c'est-à-dire au Moulin de Gasconnet (station hydro dite de Lavalette). Par ailleurs, sur ces mêmes abaques, on indique l'intervalle d'incertitude pour les débits et les cotes locales. La géométrie de la section en travers locale est représentée sur l'abaque, ce qui permet de visualiser les risques de débordements ou les revanches disponibles. Ces abaques, pour la partie hydraulique ont vocation à être utilisés en série avec les sorties des abaques précédemment décrites pour la partie hydrogéologique et hydrologique.

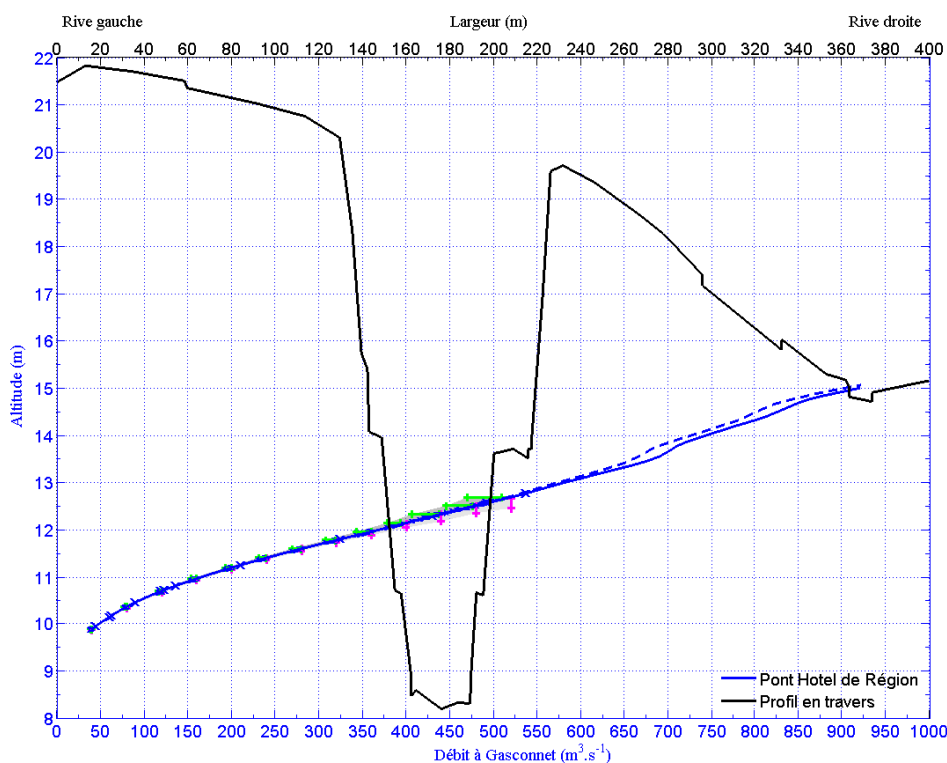


Illustration 66 : Exemple d'abaque (à l'Hotel de Région) donnant les cotes atteintes en fonction du débit amont (au Moulin de Gasconnet) ainsi que les incertitudes liées à la forme de la crue

5.4.8. Incertitudes

Différences avec l'étude menée par BRL en 2010

Nous avons comparé notre modélisation du Lez en crue avec celle effectuée par BRL en 2010. Nous avons mis en évidence des différences significatives aux alentours du seuil de Garigliano. En effet, le calage de notre modèle sur les données de la banque Hydro a nécessité de supprimer une section de données très étroite à l'aval du seuil et de définir des coefficients de Strickler anormalement forts. Ce calage différent entre les deux modèles provoque des différences importantes sur le calcul de la ligne d'eau (1 m à l'aval du seuil). Des observations terrains du Lez en crue sont encore nécessaires afin d'affiner la modélisation dans cette zone. La proximité de l'équipe d'Irstea permettra de réaliser ce suivi et de faire évoluer le modèle si nécessaire. Nous avons remarqué que certaines différences importantes sont aussi provoquées par les ouvrages en travers dont la géométrie est probablement différente entre les deux modèles (cas du seuil de Lavalette où l'écart sur la cote du seuil est d'environ un mètre, prise en compte de certains ponts dans le modèle réalisé par BRL). Sur les autres zones communes couvertes par la modélisation les résultats des simulations sont assez proches (10 cm près).

Calage effectué avec les données de la banque Hydro

Le modèle hydraulique a été calé dans le logiciel SIC afin de reproduire le plus précisément possible les données de crue de la banque Hydro. Cependant, certaines observations terrains (laisses de crue relevées en 2005) sont contradictoires avec le modèle notamment autour du seuil de Garigliano (écart d'environ 90 cm à l'aval). Dans les autres zones, les données coïncident de manière satisfaisante (10 cm près). Les caractéristiques hydrauliques de ce seuil et du bief aval sont encore mal déterminées et le modèle nécessite d'être recalé lorsque de nouvelles données mesurées seront disponibles.

Conclusion et recommandation :

Les résultats de cette étude montrent que le temps de propagation des crues dans le Lez est très court et ne laisse que peu de temps pour prendre des mesures en période de crise (environ 30 minutes pour Garigliano et 1h15 pour la 3^{ème} écluse de Lattes). Les apports le long du Lez peuvent être très importants lors de certains événements et les affluents du Lez nécessitent d'être surveillés.

L'étude a permis de fournir des abaques complémentaires à l'abaque hydrologique. Ces abaques pourront être utilisés pour évaluer la hauteur d'eau, les débits et les éventuels débordements le long du Lez en période de crue.

Nous recommandons néanmoins d'installer des capteurs le long des affluents du Lez (notamment sur la Lironde et le Verdanson) afin d'évaluer ces apports qui semblent parfois très importants. La station de mesure située au niveau de la 3^{ème} écluse à Lattes doit continuer à être améliorée au fur et à mesure de la disponibilité de nouveaux jaugeages. Actuellement elle semble fortement minimiser les débits.

6. Gestion active et changement global

6.1. CLIMAT PRESENT ET SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS

Référence : rapport BRGM RP-61050-FR

L'analyse des longues chroniques de données disponibles au niveau des cinq stations météorologiques présentes à proximité du bassin d'alimentation du Lez (Mont Aigoual, Saint-Martin de Londres, Prades-le-Lez, Montpellier, Gignac) montre un comportement typiquement méditerranéen des précipitations avec les cumuls les plus importants observés en octobre-novembre (épisodes cévenols) et sur les reliefs plutôt que sur le littoral. L'analyse statistique montre une tendance à la hausse des précipitations d'automne sur les 30 dernières années, qui entraîne, pour la plupart des stations, une hausse des cumuls annuels. Pour le reste de l'année, toutes les stations présentent un comportement stationnaire, sauf la station du Mont Aigoual qui affiche une hausse des précipitations hivernales et printanières.

Les données de température disponibles traduisent les positions géographiques des stations météorologiques, avec des températures plus douces et une amplitude thermique plus grande en bordure littorale que dans le massif des Cévennes. L'analyse statistique conduit à mettre en évidence une tendance significative à la hausse des températures moyennes annuelles sur toutes les stations, essentiellement reliée à une hausse des températures printanières et estivales. La hausse observée n'apparaît par contre pas systématiquement sur les séries de températures maximales et minimales (pour les stations qui enregistrent ce type de données) et lorsqu'on l'observe, c'est essentiellement au printemps et, dans une moindre mesure, en été.

Les résultats obtenus au terme de cette analyse sont cohérents avec d'autres études menées sur la même problématique et sur des territoires proches (Chaouche et al., 2010, Lespinas et al., 2009, Moisselin et al., 2002).

Pour explorer le climat futur, 9 scénarios climatiques ont été obtenus à partir des simulations des modèles de climat désagrégés disponibles dans le cadre du projet SCRATCH 2010 du CERFACS (Pagé et Terray 2010), à l'horizon 2045-65, pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B. Ce scénario constitue une hypothèse médiane parmi la fourchette des scénarios d'émission proposée par le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat – www.ipcc.ch) dans le cadre de son rapport spécial SRES sur cette question (Nakicenovic et Swart, 2000). Les résultats simulés, traduits en termes d'anomalies moyennes mensuelles (Illustration 67), indiquent une augmentation de la température moyenne mensuelle comprise entre +1,5°C et +2,3°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) suivant la période de l'année, en moyenne multi-modèle. Les augmentations de température obtenues s'expriment de manière plus marquée et sont affectées d'une variabilité intra-scénarios moindre pour l'automne et l'hiver, que pour le printemps et l'été. C'est à cette saison cependant que l'on observe les scénarios d'augmentation de la température les plus extrêmes. Les augmentations prévues par les scénarios apparaissent homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude et ce quelle que soit la saison.

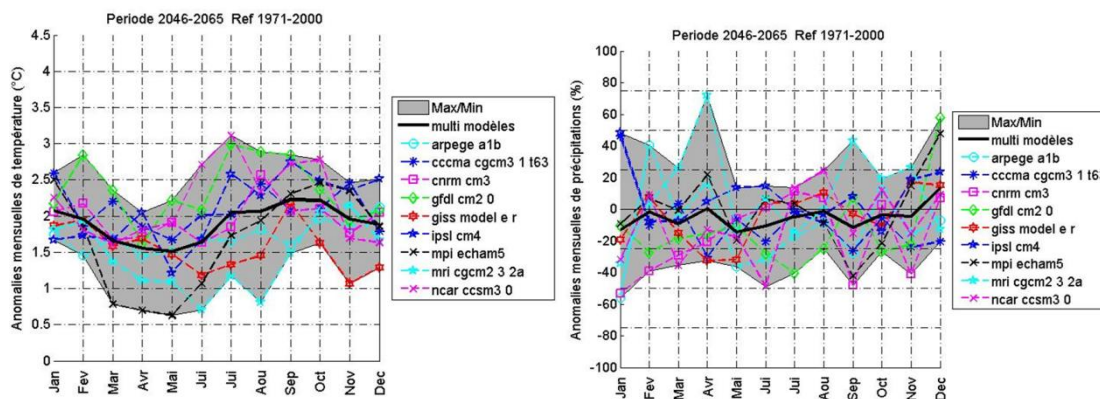


Illustration 67 : Anomalies moyennes mensuelles de température (a) et de précipitations (b) entre le présent et le futur pour chaque scénario climatique, en moyenne de tous les scénarios et en courbe enveloppant les valeurs minimales et maximales des anomalies pour chaque mois, tous scénarios confondus, sur le bassin hydrogéologique du Lez

Pour les précipitations, les scénarios prévoient une diminution des précipitations mensuelles de l'ordre de -5 à -10% en moyenne multi-modèle. Seul le mois de décembre présenterait des précipitations en augmentation de l'ordre de +10% par rapport au présent, en moyenne multi-modèle. Ces résultats sont cependant affectés par une très forte variabilité entre les scénarios (variations mensuelles de $\pm 50\%$ par rapport aux précipitations présentes) qui rend le signal moyen décrit très incertain. Cette variabilité est cependant maximale en hiver et moindre au printemps, été et automne, ce qui renforce le signal globalement à la baisse des précipitations prévues à l'échelle annuelle. Les signaux obtenus présentent une variabilité spatiale qui s'exprime notamment par une diminution moindre (voire par une augmentation en hiver) des précipitations au niveau de l'extrême nord-est de la zone d'étude, en toutes saisons, en dehors du printemps. Cette variabilité n'impactera cependant pas ou peu le signal moyen d'entrée pour la modélisation hydrologique et hydrogéologique.

La comparaison des évolutions observées au cours des 30 dernières années avec les scénarios climatiques obtenus font apparaître ces derniers comme cohérents, dans la mesure où ils prévoient une situation future qui serait dans la continuité des observations sur l'évolution de la température au cours de la période présente.

Concernant les précipitations, les scénarios climatiques proposent une situation future plutôt à la baisse qui semble apparemment contradictoire avec les observations sur les 30 dernières années, notamment au regard de la hausse des précipitations observée en automne. Aucune conclusion ne doit cependant être tirée de cette apparente contradiction, probablement issue de la combinaison des mécanismes majeurs susceptibles de contrôler l'évolution du climat (variabilité naturelle du climat, oscillations climatiques – ENSO par exemple, activité solaire, réchauffement atmosphérique d'origine anthropique). Ceci montre simplement l'importance des incertitudes qui affectent la compréhension et la modélisation des processus climatiques, qu'il apparaît crucial de garder à l'esprit lorsque l'on conduit des études d'impact du changement climatique.

6.2. PRELEVEMENTS ACTUELS ET SCENARIOS FUTURS

Référence : rapport BRGM RP-61050-FR

6.2.1. Données de prélèvements actuels (à la source du Lez)

L'évolution des débits (mensuels et annuels) prélevés à la source du Lez sur la période 1974-2010 est reportée dans l'illustration 68. Les volumes pompés en 1986 apparaissent les plus élevés de toute la période (39 003 724 m³ ≈ 39 Mm³/an). De l'analyse des données disponibles, il ressort que le volume moyen interannuel de pompage est de 34 985 079 m³ (≈ 35 Mm³/an) sur la période 1983-2010 (période de gestion active par pompage dans le drain karstique). Les volumes moyens pompés lors de la dernière décennie apparaissent légèrement plus faibles (de l'ordre de 33 Mm³/an).

Q_plvt_Lez (en l/s)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
---------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Illustration 68 : Synthèse des débits de prélèvements (mensuels et annuels) à la source du Lez

6.2.2. Scénarios de prélèvements futurs (à la source du Lez)

Dans le but de discuter de l'effet du changement climatique sur les ressources en eau du système karstique du Lez, il faut au préalable définir une chronique de prélèvement de référence, constante d'un cycle hydrologique à l'autre.

Dans cette étude, pour construire la chronique de référence de pompage ($Qp0$), nous avons considéré la chronique d'évolution du débit de pompage de l'année 2010 (31,7 Mm³ pour l'ensemble de 2010). Cette chronique, qui inclut le volume nécessaire au débit réservé, permet de bien rendre compte de l'augmentation de la demande du printemps (à partir de mi-mai), puis de la demande soutenue des mois d'été (juillet, août) suivie d'une diminution progressive de la demande en automne (septembre, octobre) pour ensuite atteindre la demande de base (de novembre à avril). Nous supposons que l'allure de cette chronique de pompage permettra également de bien décrire l'évolution de la demande en eau potable dans le futur.

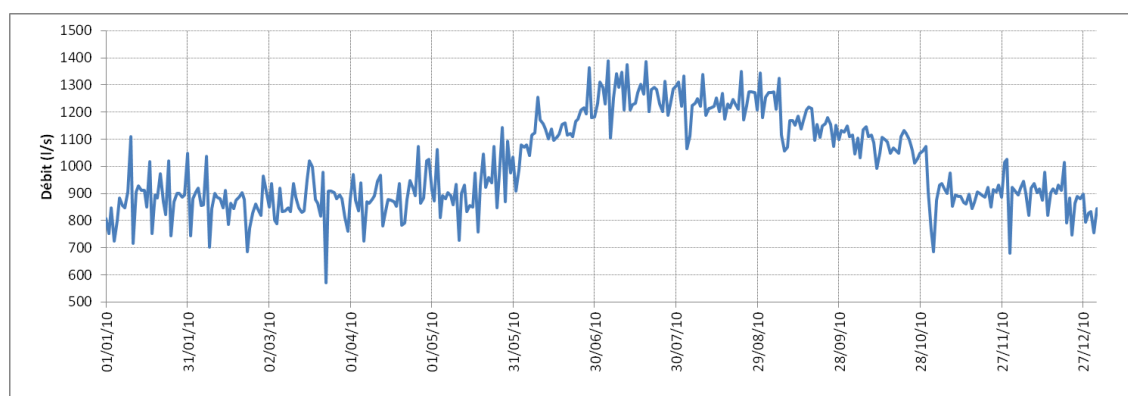
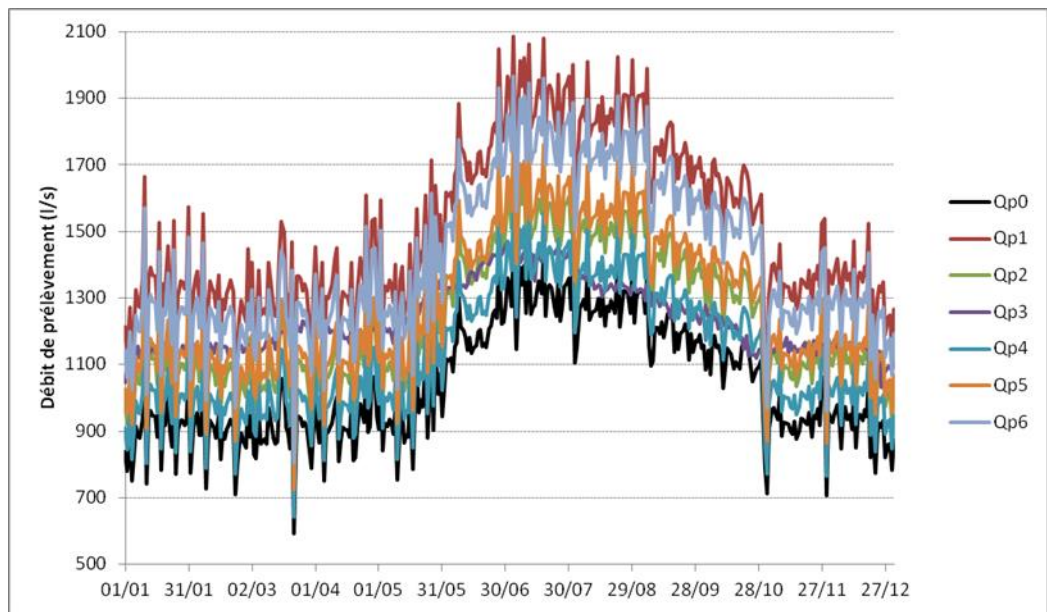


Illustration 69 : Evolution du débit de pompage journalier à la source du Lez en 2010

Le scénario de référence de pompage ($Qp0$) est construit à partir de la chronique de 2010 en considérant une augmentation globale de 4 % environ afin d'obtenir un volume de prélèvement annuel de 33 Mm³ correspondant au volume médian de la période 2000-2010 (voir § 6.2.1).

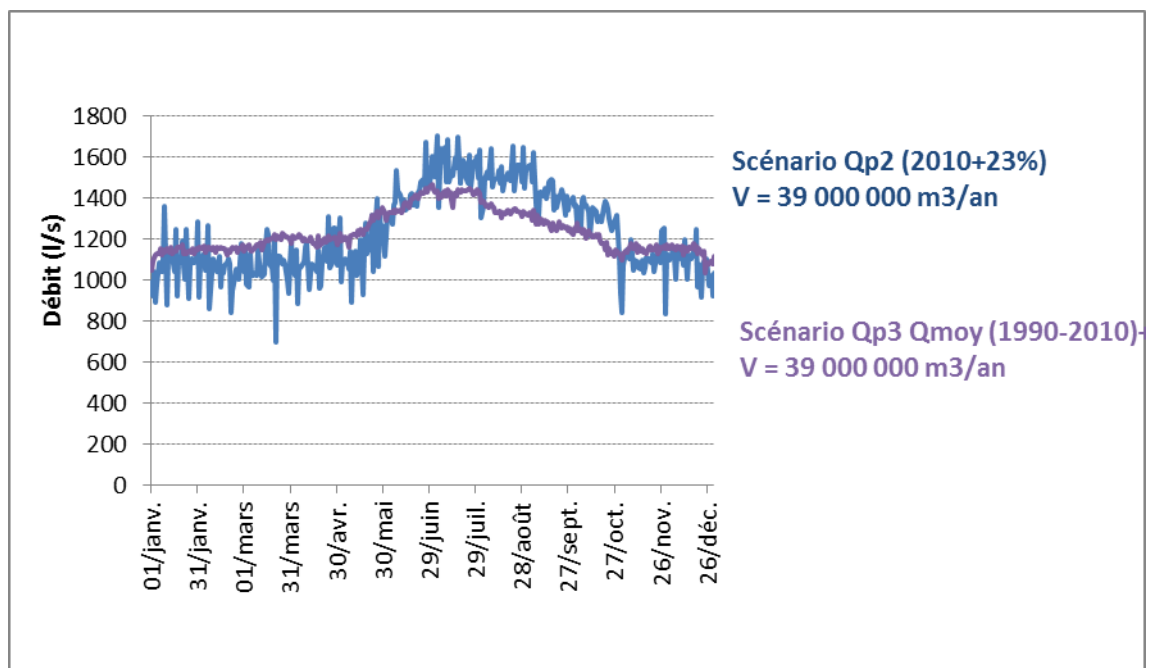
A partir de la chronique de pompage de 2010, cinq scénarios de pompage ont été construits ($Qp1$; $Qp2$; $Qp4$; $Qp5$ et $Qp6$), correspondants à des valeurs variables de volumes annuels. L'évolution des chroniques ainsi que les principales caractéristiques (débits minimum, maximum, moyen et volume annuel) sont reportées dans l'illustration 70.

Un autre scénario alternatif de pompage a été également considéré ($Qp3$). Ce scénario est construit sur la base de la chronique des débits moyens pompés sur la période 1990-2010 (volume de prélèvement annuel de 34,5 Mm³) en considérant une augmentation globale de 13 % environ afin d'obtenir un volume de prélèvement annuel de 39 Mm³ (c'est le volume de prélèvement le plus extrême jamais atteint à ce jour sur le système du Lez, en 1986 cf. Illustration 68). Le volume annuel pompé du scénario $Qp3$ est identique au volume du scénario $Qp2$ (39 Mm³). Ces deux chroniques ($Qp2$ et $Qp3$) ont permis d'évaluer le comportement du système karstique pour deux stratégies de pompage différentes à volume annuel identique (Illustration 71). Dans le scénario $Qp2$, le débit de pompage (demande de base) de l'hiver est plus faible que celui du scénario $Qp3$ (1080 l/s contre 1170 l/s en moyenne, cf. tableau de l'illustration 70) tandis que le débit pompé en été du scénario $Qp2$ est supérieur à celui de $Qp3$ (1440 l/s contre 1320 l/s en moyenne).



	Min	Max	Moy	V	Moy	Moy
	l/s	l/s	l/s	Mm3	JFMAM_ND	JJOSO
Qp0 (2010->33Mm3)	592	1441	1044	33	918	1219
Qp1 (2010->47.7Mm3)	856	2085	1510	47.7	1122	1763
Qp2 (2010-> 39 Mm3)	699	1704	1234	39	1084	1440
Qp3 (Qm 1990-2010)-> 39 M3	1033	1469	1237	39	1173	1324
Qp4 (2010->35.7Mm3)	641	1562	1131	35.7	994	1320
Qp5 (2010->40.3Mm3)	725	1765	1278	40.3	1123	1492
Qp6 (2010->44.9Mm3)	807	1966	1423	44.9	1251	1662

Illustration 70 : Caractéristiques des scénarios de pompage utilisés dans les modélisations

Illustration 71 : Comparaison des scénarios de pompage Qp2 et Qp3 (39 Mm³/an)

6.2.3. Scénarios de prélèvements et Schéma Directeur d'Alimentation en Eau Potable (SDAEP)

La Communauté d'Agglomération de Montpellier élabore son Schéma Directeur AEP. Elle étudie les besoins à satisfaire en eau potable à l'horizon 2030 en se basant sur le scénario 5 des perspectives INSEE 2030 qui retient un taux d'évolution de +0,9 % par an. Ce taux conduit à une population sur le territoire de la Communauté d'Agglomération de Montpellier de 466 000 habitants en 2020 et de 510 000 en 2030.

La source du Lez occupe une place prépondérante parmi les ressources pouvant concourir à la satisfaction future des usages en eau et l'étude SDAEP en cours cherche à savoir (i) si les besoins établis pour 2030 (incluant les obligations contractuelles liées aux ventes d'eau en gros et à la DUP) pourront être satisfaits par la seule source du Lez et si (ii) le périmètre actuel desservi par la source du Lez pourrait être élargi pour englober de nouvelles communes notamment au sud de l'Agglomération.

Les besoins en eau sont estimés en formulant deux hypothèses de consommation : (i) une hypothèse haute correspondant au maintien des consommations et ratios actuellement observés et (ii) une hypothèse basse basée sur une baisse de 10% des consommations actuelles et l'application d'un ratio de consommation dit "maîtrisé" pour les consommations "nouvelles".

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Hypothèse	Besoins AEP (Mm ³)
périmètre actuel	Basse	35,1
	Haute	39,4
périmètre élargi	Basse	39,8
	Haute	44,9

Illustration 72 : hypothèses de prélèvements futurs à la source du Lez pour les besoins AEP selon le SDAEP 2030

A ces prélèvements, il convient d'ajouter les besoins du milieu aquatique qui sont fonction de la valeur du débit réglementaire restitué ainsi que du scénario de pompage puisque ce dernier influe sur la durée de la période de non débordement naturel.

Les hypothèses de prélèvements futurs pour les besoins totaux à la source du Lez peuvent ainsi être estimées entre 38 et 50 Mm³. Dans le cadre d'une hypothèse de consommation basse sur le périmètre actuel, un volume annuel de 40 Mm³ apparaît comme une hypothèse possible.

6.3. IMPACT DU CHANGEMENT GLOBAL (CLIMATIQUE ET PRELEVEMENTS) SUR LES RESSOURCES EN EAU DU SYSTEME KARSTIQUE DU LEZ

Référence : rapport BRGM RP-61050-FR

Dans cette étude, le modèle hydrogéologique Tempo (voir § 3.2.2) calibré sur la base des données observées (pluviométrie, débit de débordement de la source, débit de pompage et piézométries du karst, cf. schéma de principe de l'illustration 20) a été utilisé pour étudier l'impact global sur les ressources en eau que provoquerait une augmentation des prélèvements (pompage) dans un contexte de changement

climatique. Nous avons utilisé les sorties des modèles climatiques pour la période présente (1971-2000) et les sorties des mêmes modèles climatiques pour le futur (2040-2065) afin d'établir des comparaisons et évaluer les impacts (voir § 6.1). L'ensemble des résultats des simulations sont décrits dans le détail dans le rapport BRGM/RP-61050-FR (Maréchal et al. 2012).

Les scénarios de changement climatique semblent avoir un impact plus marqué sur la recharge par les pluies efficaces (quantité d'eau qui contribue à recharger les aquifères) que sur la pluviométrie elle-même. La recharge par les pluies efficaces serait ainsi significativement diminuée au futur, se traduisant par une baisse de -30% du cumul annuel moyen de pluie efficace en valeur moyenne multi-modèles. Cette réduction s'observerait surtout sur les périodes automnales et printanières, et dans une moindre mesure en hiver. Cette diminution de la recharge induira un impact vis-à-vis des ressources en eau contenues dans les systèmes karstiques. L'impact du changement climatique (scénario 2 : Qp0 et climat futur) se manifestera par une diminution de la piézométrie notamment lors des périodes estivales (Illustration 73). Durant la période estivale, les niveaux piézométriques en contexte de changement climatique seront plus fréquemment (+ 6 % du temps, Illustration 78) situés dans la tranche d'eau 45-35 m NGF. L'impact du changement climatique se traduirait aussi par une légère augmentation de la durée des assecs (débit de débordement nul) de la source du Lez (+30 jours en moyenne par rapport à la période de référence, soit + 8 % du temps, Illustration 78), ainsi que par une légère diminution du débit moyen de débordement de la source lors des périodes de hautes eaux.

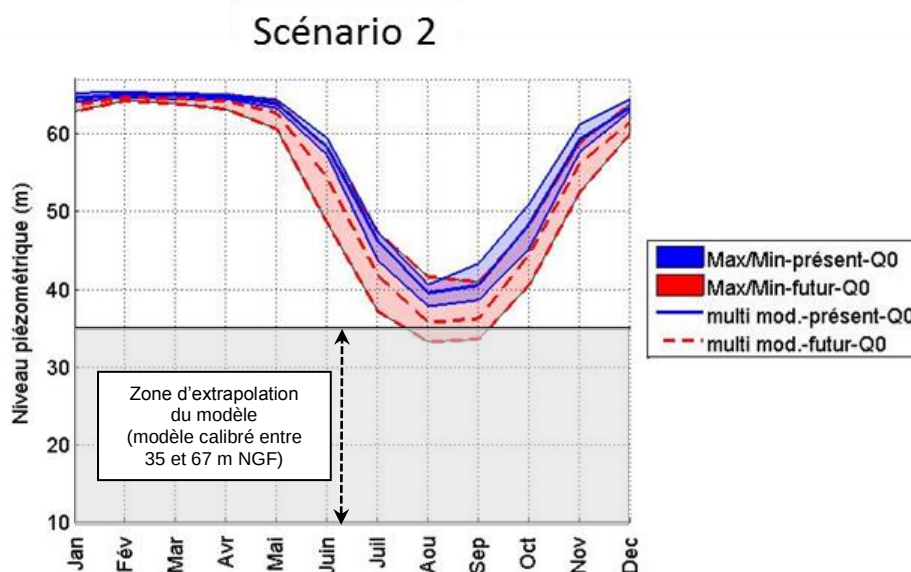


Illustration 73 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Traits pleins bleus : scénario de référence = climat présent [1971-2000] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0]. Traits pointillés rouges : climat futur [2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0]. Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle. La limite 35 mNGF correspond au niveau d'eau minimum autorisé par le Déclaration d'Utilité Publique.

L'impact du changement global (combinaison du changement climatique à l'horizon 2046/2065 et d'une augmentation des prélèvements sur les ressources en eau du Lez) a été évalué à l'aide de six scénarios de pompage (cf. Illustration 70): Qp1, Qp2, Qp3, Qp4, Qp5 et Qp6. Les résultats du scénario 5 (Qp5 qui peut être considéré comme une

hypothèse possible de prélèvement futur) sont rappelés ci-après (Illustration 74), les résultats des autres scénarios de pompage étant par ailleurs rassemblés dans le tableau de synthèse (Illustration 78).

Ainsi, l'impact du changement global se traduirait par une baisse générale du niveau piézométrique par rapport au scénario de référence (Illustration 74). Entre les mois de juillet et septembre, l'augmentation des pompages (Scénario $Qp5$) et l'impact du changement climatique provoqueraient entre 12 et 13 mètres de rabattement supplémentaire par rapport au scénario de référence (Illustration 74), la piézométrie moyenne mensuelle interannuelle pour ce scénario serait comprise entre 25 m NGF et 33 m NGF en période d'étiage.

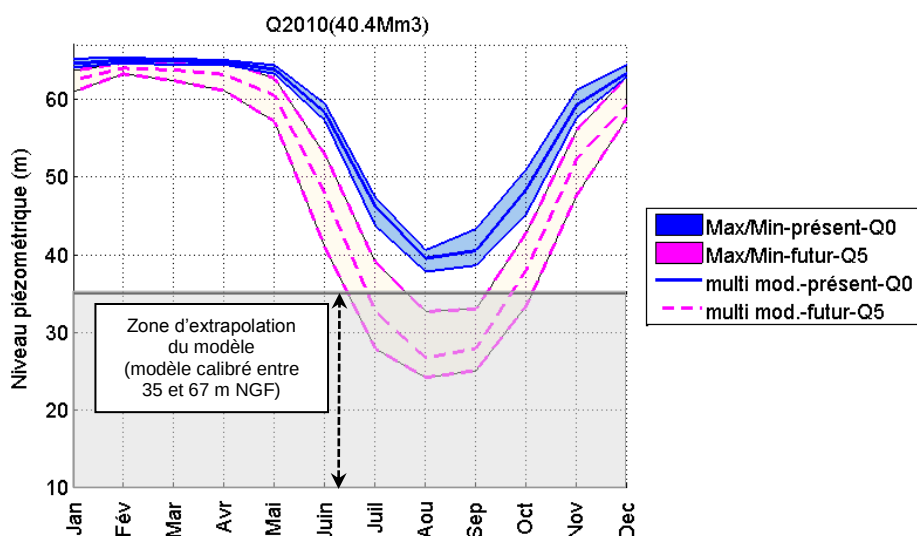


Illustration 74 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Traits pleins bleus : scénario de référence = climat présent [1971-2000] et prélèvement médian actuel [$33 \text{ Mm}^3/\text{an} = Qp0$]. Traits pointillés roses : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [$40,4 \text{ Mm}^3/\text{an} = Qp5$]. Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle. La limite 35 mNGF correspond au niveau d'eau minimum autorisé par le Déclaration d'Utilité Publique.

Dans le scénario $Qp5$ (pompage à débit $Qp5$ et climat actuel), la fréquence d'occurrence de la tranche d'eau 45-35 m NGF augmenterait de 5% et celle inférieure à 35 m de 7% (Illustration 78). Cependant, la fréquence d'occurrence de niveaux d'eau inférieurs à 20 n'augmenterait que de 2%.

Les fréquences d'occurrence absolues des tranches piézométriques calculées pour les différents scénarios simulés sont décrites à l'Illustration 75 et à l'Illustration 76.

Rappelons que le modèle Tempo a été calibré et validé sur une tranche d'eau comprise entre 35 et 67 mNGF. Les résultats du modèle en-dehors de ces gammes de niveaux d'eau sont entachés d'incertitudes plus grandes car ils ont nécessité l'hypothèse d'un comportement hydrodynamique du système karstique identique pour des niveaux inférieurs à 35 mNGF.

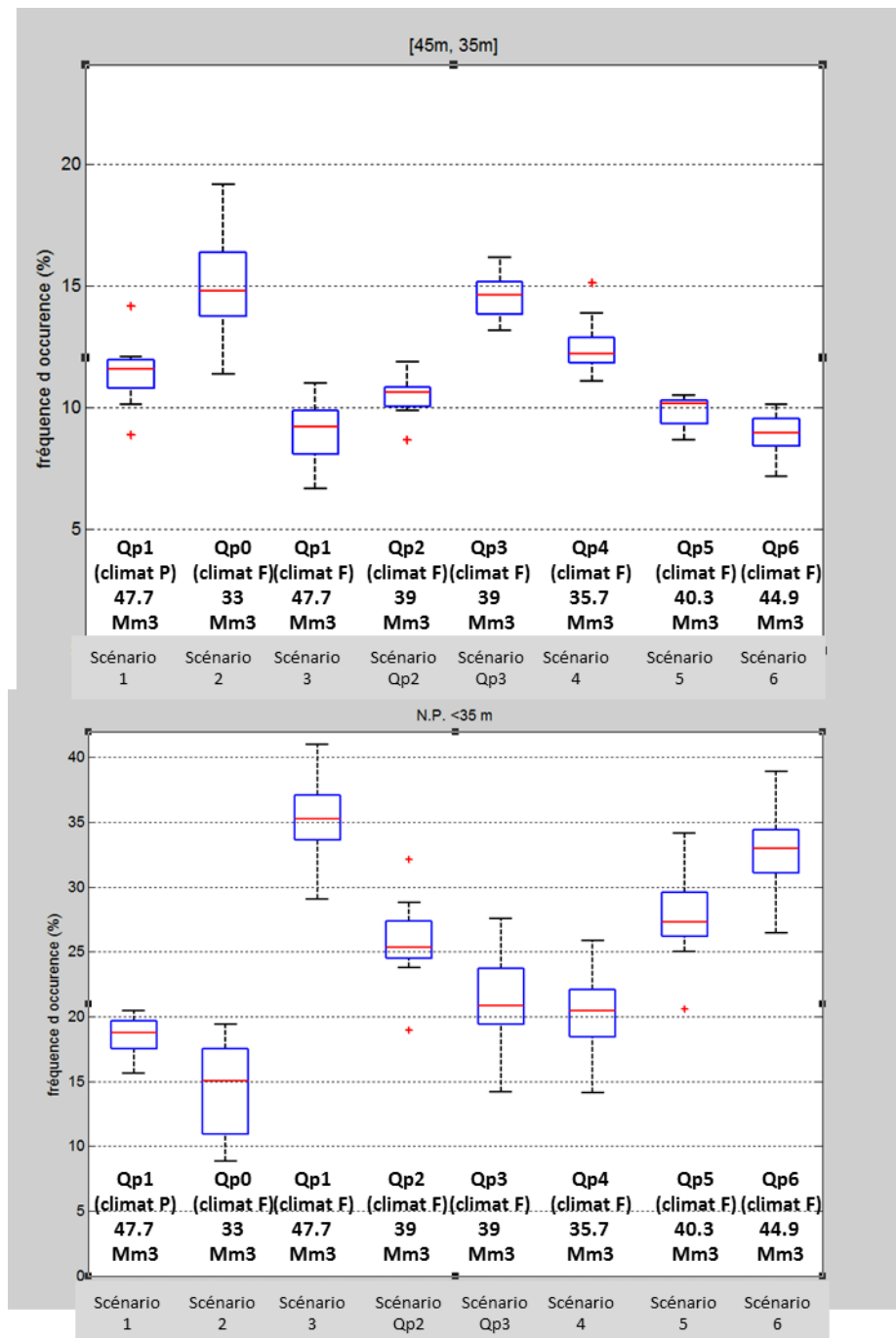


Illustration 75 : Dispersion des fréquences d'occurrences du niveau piézométrique calculées à l'aide des modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent), pour 2 intervalles de niveau piézométrique distincts « 45-35 m NGF et <à 35m NGF ». Les fréquences d'occurrence sont calculées en considérant le nombre total d'occurrences journalières sur les périodes considérées ([1971-2000] et [2046-2065]). La tranche d'eau < 35 mNGF est en-dehors de la gamme de calibration et validation du modèle.

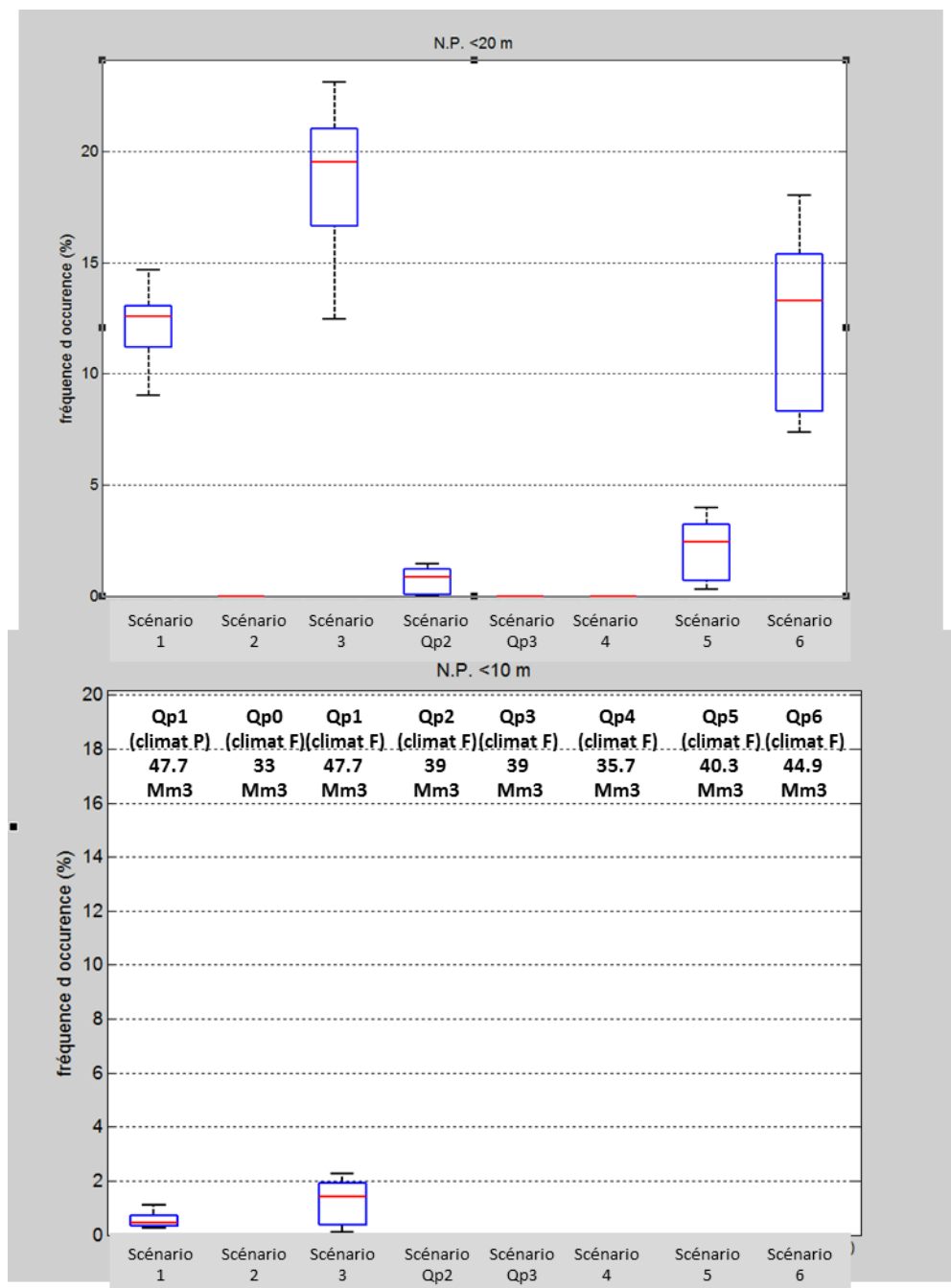


Illustration 76 : Dispersion des fréquences d'occurrences du niveau piézométrique calculées à l'aide des modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent), pour 2 intervalles de niveau piézométrique distincts « < à 20 m NGF et < à 10m NGF ». Les fréquences d'occurrence sont calculées en considérant le nombre total d'occurrences journalières sur les périodes considérées ([1971-2000] et [2046-2065]). Ces tranches d'eau sont en-dehors de la gamme de calibration et validation du modèle.

Pour le critère de débit de débordement, l'impact du changement global se traduirait par une amplification des tendances à la diminution de l'intensité des crues de fréquence décennale. Ce résultat est lié au rôle de « modérateur de crue » que joue le système karstique soumis à une gestion active par pompage. En effet, lors des premières crues automnales (qui sont généralement les plus fortes), une partie des flux d'eau contribue à recharger les réserves sollicitées par les pompages estivaux (plus importants qu'au présent dans le cas de ce scénario), ce qui limite ou réduit l'importance des crues de reprise de cycle hydrologique (§ 5.2). Ce phénomène traduit

de manière globale la reconstitution des réserves qui a lieu suite aux périodes de sollicitation du karst par les pompages. Ces résultats sont également à mettre en perspective avec les valeurs des débits moyens mensuels de débordement de la source du Lez qui présenteraient une tendance à la diminution selon le scénario considéré (Illustration 77).

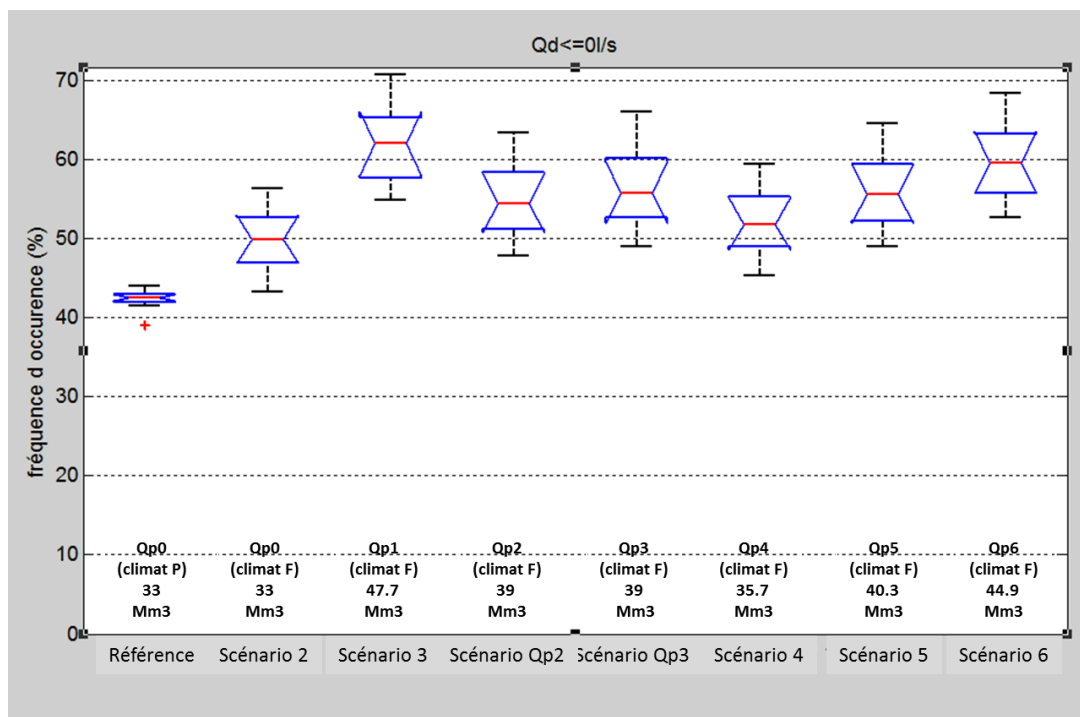


Illustration 77 : Dispersion des fréquences d'occurrences pour lequel le débit de débordement à la vasque est nul ($Q_d \leq 0$ l/s) calculée à l'aide des 9 modèles hydroclimatique en considérant les scénarios 1, 2, 3, 4, 5 et 6, les scénarios avec Qp2 et Qp3 à 39 Mm³/an et le scénario de référence (représentation en diagramme « Box-Plot »)

Référence = climat présent [1970-2000] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0] ;
Scénario 1 = climat présent [1970-2000] et prélèvement augmenté [Qp0+44% = 47,5 Mm³/an = Qp1] ; (non présenté ci-dessus)
Scénario 2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0] ;
Scénario 3 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [Qp0+44% = 47,5 Mm³/an = Qp1]
Scénario 4 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [Qp4=35,7 Mm³/an]
Scénario 5 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [Qp5= 40,3 Mm³/an]
Scénario 6 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [Qp6= 44,9 Mm³/an]
Scénario Qp2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [Qp2= 39 Mm³/an]
Scénario Qp3 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [Qp3= 39 Mm³/an]

Les débits de débordement (Q_d) en contexte de changement global seraient réduits par rapport à ceux du scénario de référence, avec une diminution comprise entre -200 et -750 l/s pour les mois d'automne, d'hiver et de printemps (novembre à mai inclus) en fonction du scénario de prélèvement considéré (Illustration 78). Ce résultat est à mettre en relation avec la diminution de la pluie efficace et l'augmentation des prélèvements pour les scénarios testés.

Pour le scénario 5 (Qp5 et climat futur), l'impact du changement global se traduirait par une augmentation de la durée des assecs de la source par rapport au scénario de référence (201 jours par an contre 153 jours, en valeur médiane multi-modèle, soit + 13% du temps). De même, le nombre de jours moyen annuel où $Q_d < 160$ l/s passe de

168 jours à 223 jours par an par rapport au scénario de référence (soit +15% du temps).

Dans le scénario Qp5 (pompage à débit Qp5 et climat actuel), l'impact de l'augmentation des prélèvements se traduirait par une augmentation de +6% du temps de la durée des assecs. De même, le nombre de jours moyen annuel où $Q_d < 160$ l/s augmenterait de +6% par rapport au scénario de référence (Illustration 78).

Climat	Prélèvement	Nom Scénario (cf texte)	(*) Baisse été/ Référence (en moy. mensuelle)	Variations des fréquences d'occurrences par rapport au scénario de référence					Variations des fréquences d'occurrences par rapport au scénario de référence			(**) Baisse Qd moy/ Référence (en moy. mensuelle)
				[45 à 35 mNGF]	[< 35 m NGF]	[< 30 m NGF]	[< 20 m NGF]	[< 10 m NGF]	Qd= 0 l/s (Qd=débit de débordement)	Qd<160 l/s	Qd>160 l/s	
Present	39 Mm3	Qp2	-6 m à -11 m	+4%	+5%	n.d.	+1%	+0%	+5%	+4%	-4%	-250 à -400 l/s
Present	40,4 Mm3	Qp5	-6 m à -12 m	+5%	+7%	n.d.	+2%	+0%	+6%	+6%	-6%	-250 à -400 l/s
Présent	47,5 Mm3	1	-18 m à -20m	+3%	+18%	+17%	+13%	+1%	+12%	+20%	-20%	-200 à -400 l/s
Futur	33 Mm3	2	-4 m à -5m	+6%	+15%	+4%	+0%	+0%	+8%	+8%	-8%	-250 à -400 l/s
Futur	47,5 Mm3	3	-21 m à -22m	-1%	+35%	+32%	+19%	+2%	+20%	+21%	-21%	-600 à -750 l/s
Futur	35.7 Mm3	4	-7 m à -8 m	+4%	+21%	+12%	+0%	+0%	+10%	+10%	-10%	-300 à -600 l/s
Futur	40,4 Mm3	5	-12 m à -13m	+1%	+27%	+21%	+3%	+0%	+13%	+15%	-15%	-400 à -600 l/s
Futur	45 Mm3	6	-17 m à -19 m	-1%	+33%	+28%	+13%	+0%	+18%	+18%	-18%	-500 à -700 l/s
Futur	39 Mm3	Qp2	-10 m à -15 m	+2%	+25%	+18%	+2%	+0%	+12%	+13%	-13%	-400 à -600 l/s
Futur	39 Mm3	Qp3	-5 m à -6 m	+5%	+22%	+10%	+0%	+0%	+13%	+16%	-16%	-400 à -600 l/s

(*) mois de juillet à septembre

(**) mois de novembre à mai inclus

En grisé: scénario de pompage Qp5 correspondant à un scénario probable du SDAEP

Les variations de fréquences d'occurrences sont calculées en considérant le nombre total d'occurrence des différents scénarios sur les périodes considérées (30 et 20 ans respectivement, pour le climat présent et le futur) en les comparant avec le scénario de référence

Exemple de lecture :

Pour le climat présent, le scénario Qp5 présente un niveau piézométrique dans la tranche d'eau [45m-35m, NGF]

dont la fréquence augmente de +5 % par rapport au scénario de référence, soit environ +18 jours par an en moyenne interannuelle

Pour le scénario Qp5, la fréquence d'occurrence d'un débit de débordement nul ($Q_d=0$ l/s) augmente de +6% du temps par rapport au scénario de référence, soit environ + 22 jours par an en moyenne interannuelle

Illustration 78 : Synthèse des principaux résultats de l'évaluation de l'impact de changement global (climatique et prélèvement) en relatif par rapport au scénario de référence

6.4. CONCLUSION

En contexte de scénario de changement climatique et d'augmentation de prélèvement, le scénario 5, avec un volume prélevé de 40,4 Mm³/an, ne provoquerait pas de surexploitation car le volume pompé demeurerait inférieur au volume de recharge. L'augmentation des prélèvements et du changement climatique conduiraient à une augmentation de la durée des assecs (de l'ordre de 50 jours supplémentaires/an) de la source, qui continuerait d'être compensée par le débit réservé.

En terme de piézométrie, le scénario 5 conduirait à des niveaux bas supérieurs à 20 m NGF, compatibles avec la position actuelle des pompes. Cependant, ces simulations réalisées en-dehors de la gamme de calibration du modèle, impliquent l'hypothèse d'un système karstique qui se comporte de façon identique dans la tranche 20-35 m NGF

par rapport à la tranche 35 – 65 m NGF habituellement testée. Pour être vérifiés, ces résultats nécessitent une expérimentation par pompage d'essai dans la tranche d'eau inférieure à 35 m NGF.

Recommandation :

Etant donné le calendrier du projet Lez-GMU, les simulations d'impact de changement climatique ont été réalisées avec les scénarios climatiques désagrégés SCRATCH2010 (Pagé et Terray 2010). Une perspective d'amélioration de ces résultats serait d'utiliser les nouveaux scénarios désagrégés SCRATCH 2013.

La réalisation d'un pompage d'essai à gros débit sur la source du Lez permettrait de solliciter au-delà des niveaux d'eau permis par la DUP actuelle et de tester la réponse hydrodynamique de l'aquifère pour une telle sollicitation et dans de telles conditions hydrologiques non encore explorées.

Dans la configuration actuelle des pompes, **cet essai pourrait être mené durant l'étiage du mois d'août à un débit moyen journalier de 2200 l/s** jusqu'à atteindre un niveau proche du niveau actuel des pompes, soit un niveau de l'ordre de 20 mètres NGF. Une instrumentation complète des paramètres physico-chimiques sera effectuée en cours de pompage avec prise d'échantillons pour analyses chimiques selon un calendrier à définir et suivi détaillé des niveaux d'eau sur l'ensemble du réseau de surveillance.

Un essai de pompage similaire (au moment où le niveau dans la vasque atteint 65 mNGF) a été simulé au moyen du modèle POKA (voir § 6.5).

6.5. SIMULATION D'UN POMPAGE D'ESSAI DE LONGUE DUREE

Dans la perspective de futurs pompages d'essais à réaliser sur la source du Lez, nous avons testé différents scénarios de pompage d'essai à fort débit suivis d'une réduction du débit de pompage pour observer la remontée induite. Le modèle Poka (Maréchal et al. 2008) a été utilisé avec les hypothèses de travail suivantes : (i) le débit naturalisé correspond au débit médian simulé par Tempo ; (ii) le débit naturalisé initial en début de modélisation est de 1064 l/s ; (iii) le niveau initial dans le drain karstique est de 65,2 m NGF soit à peu près l'altitude du déversoir de la vasque ; (iv) la durée des simulations est de 30 jours.

Les scénarios de pompages sont les suivants : pompage à fort débit (2200 l/s) pendant des durées variables de 7 jours (scénario a), 10 jours (scénario b), 14 jours (scénario c) et 21 jours (scénario d) puis pompage à 1050 l/s pendant respectivement 23, 20, 16 et 9 jours.

Les résultats des simulations en termes d'évolution du rabattement dans le drain karstique sont donnés à l'illustration 79. On constate que les durées de scénarios simulées (< 21 jours) n'engendrent pas un rabattement tel que le niveau d'eau atteigne la limite actuelle de niveau fixée par la DUP (35 m NGF). Pour rappel, le modèle POKA perd de la précision au-delà de 20 à 30 jours de simulation : il n'est donc pas raisonnable de proposer une durée précise de pompage à fort débit (2200 l/s) nécessaire pour atteindre cette cote. Toutefois, on peut affirmer grossièrement que la durée nécessaire est de l'ordre du mois aux incertitudes et hypothèses près (débit médian naturalisé, homogénéité de la réponse en-dessous de 40 m NGF) inhérentes à ces modélisations.

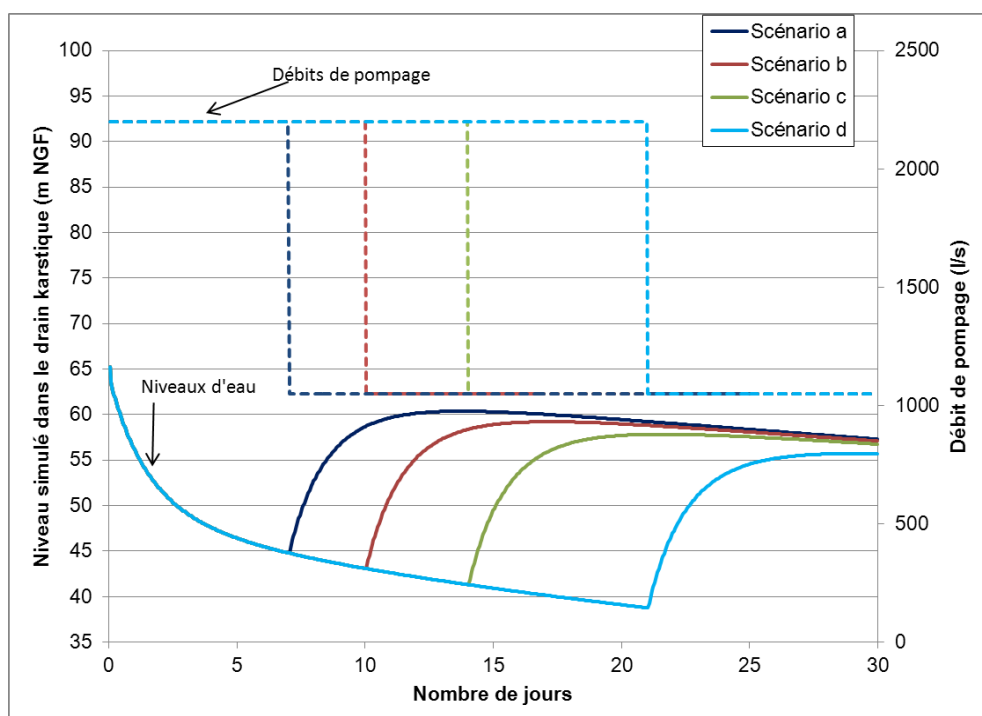


Illustration 79 : évolution temporelle des niveaux d'eau simulés dans le drain karstique et des débits de pompages correspondant aux scénarios a, b, c et d

L'augmentation de la durée du pompage à haut débit (du scénario a au scénario d) induit un accroissement de la sollicitation de la matrice calcaire (Illustration 80). Quelle que soit la durée du pompage à fort débit (7, 10, 14, ou 21 jours), le niveau dans le drain remonte rapidement en 5 à 7 jours de 15 à 17 mètres suite à la réduction du débit de pompage. Plus la durée de pompage fort est élevée, plus élevée et plus lente est la remontée. Les rabattements finaux simulés après 30 jours sont compris entre 7,9 et 9,5 mètres (Tableau de l'illustration 80), soit des écarts relativement faibles.

	Scénario a	Scénario b	Scénario c	Scénario d
Durée pompage à haut débit (j)	7	10	14	21
Rabattement (m)	7,9	8,1	8,5	9,5
Volume de sollicitation de la matrice (m ³)	1 245 000	1 542 000	1 937 000	2 624 000
Volume de sollicitation des drains (m ³)	63 000	65 000	68 000	76 000
Volume total de sollicitation de l'aquifère (m ³)	1 308 000	1 607 000	2 005 000	2 700 000

Illustration 80 : synthèse des rabattements simulés et des volumes de sollicitation calculés en fin de simulation des scénarios de remontée a, b, c et d.

Recommandation :

Les résultats du modèle POKA indiquent que, lors d'un pompage à fort débit (2200 l/s), la durée nécessaire pour que le niveau piézométrique atteigne 35 mNGF serait de l'ordre du mois aux incertitudes et hypothèses près (débit médian naturalisé, extrapolation de la réponse en-dessous de 40 mNGF) inhérentes à ces modélisations. Quelle que soit la durée du pompage à fort débit (7, 10, 14, ou 21 jours), le niveau dans le drain monterait rapidement en 5 à 7 jours de 15 à 17 mètres suite à la réduction du débit de pompage (passage de 2200 à 1050 l/s).

7. Conclusion générale

Le projet de recherche Lez-GMU a permis d'améliorer la compréhension de la structure et du fonctionnement de l'hydrosystème du Lez et d'émettre un certain nombre de recommandations pour une meilleure gestion active de la ressource. Les principaux avancements scientifiques sont les suivants :

- l'élaboration de coupes géologiques et d'un modèle géologique tridimensionnel permettent de mieux comprendre les écoulements souterrains et les échanges possibles entre compartiments souterrains. Ce modèle pourra être encore affiné et servir de base à la constitution d'un modèle hydrogéologique maillé ;
- un historique des phases principales de karstification a été proposé. De cette étude, il ressort une compétition du contrôle de la karstification entre, d'une part, le gradient hydraulique général N-S et la fracturation préexistante NS (et EW), et d'autre part, les accidents majeurs d'origine tectonique (notamment les failles NE-SW) ayant un rôle de conduit/barrière. Malgré le contexte méditerranéen de cet hydrosystème, le Messinien n'est pas la période prépondérante en terme de karstification des carbonates. En effet, les périodes précoces de karstification prédéterminent les directions d'écoulements souterrains qui vont ensuite perdurer jusqu'à l'actuel. Toutefois, la karstification associée à la crise messinienne demeure importante, notamment en profondeur, mais elle est guidée par les réseaux karstiques précoces du Crétacé jusqu'à l'Eocène ;
- la critique synthétique des essais de traçage anciens et la réalisation de nouveaux essais ont apporté des éléments complémentaires sur les limites du bassin hydrogéologique de la source du Lez. Des pistes d'essais de traçages complémentaires sont suggérées notamment pour confirmer les relations éventuelles entre certaines pertes et la source du Lez. Ces essais pourront être menés à l'occasion de projets d'aménagement ou plus globalement dans le cadre de la poursuite de l'amélioration des connaissances sur la source et son bassin hydrogéologique ;
- la réalisation d'un forage d'exploration au Triadou avec la présence de venues d'eau importantes à l'altitude -170 m NGF et des images vidéo permettent de mettre en évidence l'extension profonde de la karstification en lien avec le drain majeur de la source du Lez. Il est suggéré d'instrumenter cet ouvrage pour l'intégrer au réseau de suivi de l'aquifère ;
- l'analyse des données hydrologiques et hydrogéologiques disponibles permet d'établir que les volumes prélevés annuellement sont inférieurs à la recharge annuelle. Les réserves sollicitées par les pompages en période de basses eaux sont reconstituées dès les premières pluies automnales aussi bien à l'exutoire principal que sur les piézomètres d'observation. Il n'y a pas d'intrusion saline liée à l'exploitation par pompage. Dans ce contexte, au moins trois des quatre conditions pour le bon état quantitatif de la masse d'eau souterraine au sens de la DCE sont remplies. Une étude complémentaire sur les volumes prélevables est en cours pour indiquer si la dernière condition, à savoir, l'absence d'impact négatif sur les eaux de surface associées, est remplie ;
- les débits naturels et de sollicitation des réserves de l'aquifère karstique par les pompages ont été simulés au moyen d'un modèle hydrogéologique. Ce même

modèle a permis de tester les effets de scénarios de changements globaux (changement climatique et augmentation des pompages) sur l'aquifère : impacts sur les niveaux piézométriques à la source du Lez et sur les débits de débordement. Il est montré que le changement climatique impactera le niveau piézométrique de la source. Des scénarios d'augmentation des prélèvements semblent toutefois possibles dans la configuration actuelle des pompes, sous réserve de modification de la Déclaration d'Utilité Publique actuelle ;

- la ressource en eau de l'aquifère karstique du Lez est de bonne qualité chimique dans l'ensemble, mais de qualité bactériologique pouvant être ponctuellement médiocre. Les principaux contaminants présents en quantités pouvant être importantes, notamment en période de crues, attestent d'une contamination par des eaux usées (fuite de réseau d'assainissement, assainissements autonomes défaillants, rejets de STEP). La présence de certaines STEP localisées en zones de vulnérabilité globale très élevée à proximité des pertes, pourrait être une cause de ces pollutions temporaires des eaux souterraines et plus particulièrement de la source du Lez. Dans ces zones, il convient de porter une attention particulière aux schémas directeurs d'assainissement notamment à l'occasion de leur révision ou leur établissement ainsi qu'à poursuivre, sur les STEP, la mise en place de traitement tertiaire et/ou l'adaptation des conditions de rejet en préconisant le « zéro rejet » ;
- l'aquifère du Lez ne semble pas présenter de contamination chronique en pesticides. Il est toutefois possible, notamment en période de crue, que certaines molécules dépassent la norme de potabilité fixée à 100 ng/l (ou 0,1 µg/l), pour les eaux destinées à la consommation humaine ;
- par ailleurs, d'un point de vue de la faune stygobie, le karst du Lez est un haut lieu de biodiversité souterraine, dont les enjeux de conservation sont importants, et qui semble relativement épargné par les influences anthropiques jusqu'à présent ;
- la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque globale de l'aquifère karstique, déterminée au moyen de la méthode Paprika a été comparée à l'occupation du sol pour caractériser le risque quant à la qualité de la ressource. Des recommandations quant aux périmètres de protection et Zone de Sauvegarde Exploitée (ZSE) ainsi que les politiques d'aménagement futur pourront s'en inspirer ;
- l'analyse hydrologique et la modélisation couplée ont permis de quantifier l'impact du niveau piézométrique initial dans le karst sur sa capacité de rétention lors d'un épisode de crue. Des simulations numériques ont testé des scénarios d'intensités et de cumuls de pluies sur le système karstique dans des conditions hydrologiques initiales différentes pour élaborer un outil d'aide à la prévision des crues au seuil de Lavalette à l'entrée de la ville de Montpellier, qui prend en compte l'état du karst avant la pluie. Une étude hydraulique de propagation des crues dans le fleuve Lez a également permis de proposer des abaques de propagation des crues au travers des villes de Castelnau-Le-Lez et Montpellier ;
- la simulation hydrodynamique d'un scénario de changement climatique et d'augmentation de prélèvement (avec un volume prélevé de 40,4 Mm³/an), ne provoquerait pas de surexploitation car le volume pompé demeurerait inférieur au volume de recharge. L'augmentation des prélèvements et du changement climatique conduiraient à une augmentation de la durée des assecs (de l'ordre

de 50 jours supplémentaires/an) de la source, qui continuerait d'être compensée par le débit réservé ;

- en termes de piézométrie, ce scénario de changement global conduirait à des niveaux bas supérieurs à 20 m NGF, compatibles avec la position actuelle des pompes. Cependant, ces simulations réalisées en-dehors de la gamme de calibration du modèle, impliquent l'hypothèse d'un système karstique qui se comporte de façon identique dans la tranche 20-35 m NGF par rapport à la tranche 35 – 65 m NGF habituellement testée. Pour être vérifiés, ces résultats nécessitent une expérimentation par pompage d'essai dans la tranche d'eau inférieure à 35 m NGF.

8. Bibliographie

Audra P., Mocochain L., Camus H., Gilli E., Clauzon G. & Bigot J. (2004). The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the Mediterranean Sea. Examples from Southern France. *Geodinamica Acta*, 17(6), 389-400.

Avias J. (1995). Gestion active de l'exsurgence karstique de la source du Lez (Hérault, France) 1957-1994, *Hydrogéologie* 1, 113-127

Bailly-Comte, V., V. Borrell-Estupina, H. Jourde, et S. Pistre. (2012). A conceptual semi distributed model of the Coulazou River as a tool for assessing surface water–karst groundwater interactions during flood in Mediterranean ephemeral rivers. *Water Resources Research*, 48, W09534, doi:10.1029/2010WR010072.

Batiot-Guilhe, C., J.L. Seidel, B. Ladouche, V. Prié, F. Cernesson, N. Dorfliger, M. Blanc, J.C. Maréchal, V. Léonardi, P.Y. Vion. (2014). Projet de gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez – Caractérisation hydrochimique ; qualité chimique, vulnérabilité de l'hydrosystème et de l'écosystème associé. Rapport BRGM/RP-61013-FR, 294 pages, 17 annexes.

Bérard, P. (1983). Alimentation en eau de la Ville de Montpellier. Captage de la source du Lez. Etude de relations entre la source et son réservoir aquifère – rapport n°2 : définition des unités hydrogéologiques. Rapport BRGM / 83 SGN 325 LRO, 22 p.

Bicalho C. (2010). Hydrochemical characterization of transfers in karst aquifers by natural and anthropogenic tracers. Example of a Mediterranean karst system, the Lez karst aquifer (Southern France). Thèse AgroParisTech, 133 pages.

Bicalho C., Batiot-Guilhe C., Seidel J.L., Taupin J. D., Patris N., Van Exter S., Jourde H. (2011). A conceptual model for groundwater circulation by using isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and geochemical tracers in a Mediterranean karst system. Congrès H2Karst, 9^{ième} Colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire, Besançon (France), 1-3 septembre 2011.

Bicalho C., Batiot-Guilhe C., Seidel J.L., Van-Exter S. and H. Jourde (2012). Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer. *Journal of Hydrology*, 450–451, 11, 206–218.

Borrell Estupina, V., M. Coustau, H. Jourde et C. Bouvier (2008). Un modèle pluie-débit pour la prévision des crues sur un bassin karstique. Cas du bassin du Lez. Colloque de la SHF Prévisions hydrométéorologiques. Lyon, 18 et 19 novembre 2008.

Borrell Estupina V., Maréchal J.-C., Coustau M., Fleury P., Jourde H., Kong A Siou L., Ladouche B., Malaterre P.-O., Mazzilli N., Ricci S. (2012) Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Modèles numériques de fonctionnement de l'hydrosystème, Rapport BRGM/RP-60222-FR, 253 pp., 113 fig., 32 tab., 2 ann

Chaouche, K., L. Neppel, C. Dieulin, N. Pujol, B. Ladouche, E. Martin, D. Salas y Melia and Y. Caballero (2010). Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change, *Comptes Rendus Geosciences*, 342(3), 234-243, doi:10.1016/j.crte.2010.02.001

Cordonnier, T. (2010). Synthèse géologique de la zone autour de l'aquifère karstique du Lez, allant de l'Hérault au Vidourle et de la Méditerranée à la Montagne des Cagnasses. Mémoire de stage de 2ème année, Université de Montpellier

Bicalho, C., C. Batiot-Guilhe, J.L. Seidel, S. Van Exter and H. Jourde (2012). Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer. *Journal of Hydrology*, 450–451, 206-218.

Biesbrouck M., Deguilhem A., Teyssier M. (2009). Caractérisation des pesticides utilisés en agriculture sur le bassin versant du Lez. Rapport Master 1 SEEC, Université Montpellier 2, 21 pages + annexes.

Clara M., Strenn B., Kreuzinger N. (2004). Carbamazepine as a possible anthropogenic marker in the aquatic environment: investigations on the behaviour of Carbamazepine in wastewater treatment and during groundwater infiltration. *Water Research*, 38, (4), 947-954.

Clauzon G., Suc J.P., Popescu S.M., Marunteanu M., Rubino J.L., Marinescu F. & Melinte M.C. (2005). Influence of Mediterranean sea-level changes on the Dacic Basin (Eastern Paratethys) during the late Neogene : the Mediterranean Lago facies deciphered. *Basin Research*, 17, 487-462.

Collin J.J. (1994). La gestion active des aquifères. *Courants*, 25, 36-42, 8 fig.

Coustau, M., V., Borrell, C., Bouvier (2011). Improvement of rainfall-runoff modelling with distributed radar rainfall data: a case study in the Lez French Mediterranean catchment. *Weather Radar and Hydrology. Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011. IAHS Publ. 3XX*

Coustau M. (2011). Contribution à la prévision des crues sur le bassin du Lez : modélisation de la relation pluie-débit en zone karstique et impact de l'assimilation de débits. Thèse de doctorat UM2 - HSM - CERFACS. Déc. 2011

Coustau, M., C. Bouvier, V. Borrell-Estupina and H. Jourde (2012a). Flood modelling with a distributed event-based parsimonious rainfall-runoff model: case of the karstic Lez river catchment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1119-1133, doi:10.5194/nhess-12-1119-2012

Coustau, M., S. Ricci, V. Borrell-Estupina, C. Bouvier and O. Thual (2012b). Benefits and limitations of data assimilation for discharge forecasting using an event-based rainfall-runoff model. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 583-596, doi:10.5194/nhess-13-583-2013

Dörfliger N., Plagnes V. (2009) : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Avec la collaboration de K. Kavouri et J. Gouin ; BRGM RP-57527-FR, 105 p., 55 ill., 4 ann.

Droque, C. (1963). Essais de délimitation du bassin d'alimentation d'une résurgence des karsts noyés languedociens. *Ann. Speleol.*, 18, 4, p. 409 -414.

Droque, C. (1964). Étude hydrogéologique des principales ressources de la région Nord Montpelliérain. Mémoire du CERH, t. 1, Montpellier, 62-121.

Durepaire, P., (1985). Inventaire et étude géologique, hydrogéologique et géomorphologique détaillés des cavités naturelles du bassin d'alimentation de la

source du Lez (Hérault). Mémoires du CERGA. USTL. Montpellier. Tome X, fascicules 4 et 5 (texte et atlas).

Fleury, P., Ladouche, B., Conroux, Y., Jourde, H., Dörfliger, N. (2009) - Modelling the hydrologic functions of a karst aquifer under active water management – the Lez spring. *Journal of Hydrology*.365, 235-243, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.037.

Harader, E., V. Borrell Estupina, S. Ricci, M. Coustau, O. Thual, A. Piacentini, and C. Bouvier (2012). Correcting the radar rainfall forcing of a hydrological model with data assimilation: application to flood forecasting in the Lez catchment in Southern France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4247-4264, doi:10.5194/hess-16-4247-2012.

Jazayeri M., Jourde H. and G. Massonnat, (2011). Influence of observation scale on the hydrodynamic analysis of well tests in a fractured reservoir. Case of the Lez karst system, Montpellier, France, *Journal of Hydrology*, 403, 321–336.

Jourde H., Dörfliger N., Maréchal JC., Batiot-Guilhe C., Bouvier C., Courrioux G., Desprats JF., Fullgraf T., Ladouche B., Leonardi V., Malaterre PO., Prié V., Seidel J.L. (2011a) Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Synthèse des connaissances récentes et passées, Rapport RP-60041-FR, 355 pp, 5 ann.

Jourde H., Lafarre A and N. Mazzilli (2011b). Flash flood mitigation as a positive consequence of anthropogenic forcing on the groundwater resource in a karst catchment. H2Karst, 9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon, 1-3 Septembre

Jourde H., Roesch A., Guinot V. and V. Bailly-Comte (2007). Dynamics and contribution of karst groundwater to surface flow during Mediterranean flood. *Environ. Geology*, 51(5), 725-730.

Ladouche, B., Maréchal, J-C. and N. Dörfliger (2014). Semi-distributed lumped model of a karst system under active management, *Journal of Hydrology* 509, 215-230, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.017

Leonardi V., Jourde H. et JC. Maréchal (2012). Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Résultats complémentaires des forages et traçages. Rapport BRGM/RP-61612-FR, 52 p., 24 ill.,1 ann

Lespinas, F., Ludwig, W. and S. Heussner (2009). Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change*, 99 (3), 425–456.

Malard, F., J. Gibert, et al. (1997). L'aquifère de la source du Lez : un réservoir d'eau ... et de biodiversité. *Karstologia*, 30, 49-54

Maréchal, J.C., Ladouche, B., Dörfliger, N. and P. Lachassagne (2008a). Interpretation of pumping tests in a mixed flow karst system. *Water Resources Research* 44 (5). W05401, doi:10.1029/2007WR006288.

Maréchal, J.C., Ladouche, B. & Dörfliger, N. (2008b). Karst flash flooding in a Mediterranean karst, the example of Fontaine de Nîmes, *Engineering Geology*, 99, 138-146, doi:10.1016/j.enggeo.2007.11.013

Maréchal, J.C., Ladouche, B. & N. Dörfliger (2009). Hydrogeological analysis of groundwater contribution to the 6-8 September 2005 flash flood in Nîmes, La Houille Blanche, 2, 2009, 88-93, doi:10.1051/lhb:2009019.

Maréchal J.C., Borrell-Estupina V., Caballero Y., Cernesson, F., Fleury P., Jay-Allemand M., Ladouche B., Malaterre P.-O. (2012) Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez—Simulations numériques de différents scénarios de changements globaux, Rapport BRGM/RP-61050-FR, 235 pp., 157 ill., 13 tab., 2 ann.

Marjolet, G., Salado, J. (1976). Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la source du Lez (Hérault).Thèse Université des Sciences et Techniques du Languedoc (Montpellier).

Mocochain L., Clauzon G., Bigot J.-Y. & Brunet P. (2006). Geodynamic evolution of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardèche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sediment. Geol.*, 188–189, 219–233.

Moisselin, J.M., Schneider, M., Canellas, C., Mestre, O. (2002). Changements climatiques en France au XXe siècle. Etude des longues séries de données homogénéisées françaises de précipitations et de températures. *La Météorologie* 38, 45–56.

Nakicenovic N. and R. Swart (2000). Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 570., www.ipcc.ch.

Paloc, H., (1966). Carte hydrogéologique de la France. Région karstique nord-montpelliéraine. Inventaire des cavités naturelles et notice explicative. Mémoires du B.R.G.M. n° 50.

Paloc, H. (1979a). Alimentation en eau de la ville de Montpellier. Captage de la source du Lez, Commune de St-Clément. Etude documentaire préalable à l'établissement de périmètres de protection. Note de synthèse. Rapport BRGM/79-SGN-319-LRO, 29 p.

Paloc H. (1979b). Alimentation en eau de la ville de Montpellier. Localisation d'un emplacement de captage dans le réseau souterrain de la source du Lez. Détermination de ses principales caractéristiques en préalable à l'exécution des travaux, BRGM/79-SGN-654-LRO, 40 p.

Pagé, C. et L. Terray (2010). Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH2010. Technical Report TR/CMGC/10/58, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875CS, Toulouse, France.

Prie V. (2008). Les mollusques souterrains comme traceurs des hydrosystèmes : application aux hydrosystèmes karstiques des massifs nord-montpelliérains. *Karstologia* 52: 7-16.

Quiers M., Batiot C., Seidel J. L., Bicalho C. C., Perette Y. and Jourde H. (2011). The fluorescence spectroscopy of Dissolved Organic Matter (DOM): a tool to characterize rapid infiltration flows and vulnerability in karst systems. Application to the Lez hydrosystem (Hérault, France). AGU-Fall meeting, San Fransisco (USA), 5-11 Dec. 2011.

Rabiet, M., F. Brissaud, J.L. Seidel, S. Pistre and F. Elbaz-Poulichet (2009). Positive gadolinium anomalies in wastewater treatment plant effluents and aquatic environment in the Hérault watershed (South France). *Chemosphere*, Volume 75, Issue 8, 1057-1064

Roesch, A. and H. Jourde (2006). Incidence d'une gestion active de la ressource en eau en milieu karstique sur le risque hydrologique. Exemple du fleuve Lez (Montpellier, France). In: proceedings of the international conference GIRE3D, Marrakech, Morocco.

Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Eos Trans. AGU*, 2, 519 – 524.

Thiery, D. et Bérard, P., avec la collaboration de Camus, A., (1983). Captage de la source du Lez. Etude de relations entre la source et son réservoir aquifère – rapport n°1 : recueil des données et établissement d'un modèle de cohérence. Rapport BRGM / 83 SGN 167 LRO, 95 p., 3 pl., 2 ann.

Zwahlen, F. (2004). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report - Action COST 620 - European cooperation in the field of scientific and technical research.



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

Direction Eau Environnement & Ecotechnologies
1039 rue de Pinville
34000 Montpellier
Tél: 04 67 15 79 90